

Г. С. КУЧИНСКИЙ

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ



6П2.1.08

К95

УДК 621.319.4

Рецензент Д. М. Казарновский

Кучинский Г. С.

К95 Высоковольтные импульсные конденсаторы.
Л., «Энергия», 1973.

176 с. с ил.

В книге рассмотрены силовые импульсные конденсаторы высокого напряжения. Приводятся характеристики основных изоляционных материалов. Рассматриваются физические процессы, протекающие в импульсных конденсаторах при различных режимах работы. Дается методика расчета основных размеров конденсаторов, индуктивности, потерь энергии, тепловой расчет и оценка сроков службы и надежности. Описываются основные современные типы отечественных и зарубежных импульсных конденсаторов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, связанных с конструированием, производством импульсных конденсаторов и их использованием в различных установках, а также для студентов вузов, специализирующихся в области техники высоких напряжений, электрофизики, электронизоляционной и кабельной техники.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Высоковольтные импульсные конденсаторы применяются в настоящее время во многих отраслях науки и техники. Эти конденсаторы широко используются в установках для высоковольтных импульсных испытаний силовых трансформаторов, аппаратов, кабелей и внешней изоляции линий электропередачи (генераторы импульсных напряжений, генераторы коммутационных перенапряжений, генераторы импульсных токов). Импульсные конденсаторные установки используются для ряда электротехнологических целей — магнитной штамповки, дробления пород, сейсмической разведки и др. Емкостные накопители энергии с использованием импульсных конденсаторов применяются во многих электрофизических установках: для получения и исследования высокотемпературной плазмы, для создания сверхсильных импульсных токов и магнитных полей. Эти конденсаторы применяются также для получения мощных импульсных источников света, в лазерной, в локационной и в ракетной технике.

Сравнение накопителей энергии различных типов (табл. 1) показывает, что конденсаторы обладают значительно меньшим энергосодержанием в единице объема, чем другие виды накопителей. Однако они могут обеспечить значительно больший импульсный ток благодаря меньшему внутреннему сопротивлению (индуктивности) и значительно большую мощность в импульсе.

Импульсные конденсаторы должны обладать:

- 1) возможно большим запасом энергии в единице объема;
- 2) малой внутренней индуктивностью и относительно хорошей добротностью;

Сравнительные характеристики накопителей энергии

Тип накопителя	Энергия в единице объема, дж/дм^3	Ток к. з., а/дм^3	Мощность в импульсе, ва/дм^3 или вт/дм^3
Аккумуляторы	$(1-5) \cdot 10^5$	$(3-10) \cdot 10^2$	$(3-10) \cdot 10^2$
Ударные генераторы . .	10^4-10^5	3—10	$(3-10) \cdot 10^4$
Индуктивные накопители	$(1-4) \cdot 10^4$	1—10	$(1-10) \cdot 10^5$
Конденсаторы	50—300	10^4	$(1-5) \cdot 10^8$

3) высокой динамической устойчивостью внутренних соединений секции и групп секций, а также контактных соединений;

4) конструкцией, обеспечивающей возможно меньшие габариты и удобное соединение конденсаторов в батарее малой индуктивности;

5) достаточным сроком службы в режиме многократных разрядов на малую индуктивность.

В настоящее время отсутствует специальная литература по импульсным конденсаторам. Ряд сведений о них изложен в [1, 30, 38].

Разработка и изготовление импульсных конденсаторов в Советском Союзе ведется в НИПКИ конденсаторостроения, на заводе «Конденсатор», в лабораториях техники высоких напряжений Ленинградского политехнического и Харьковского политехнического институтов. В последнее время создан ряд типов конденсаторов, находящихся по характеристикам на уровне лучших зарубежных образцов. Имеющийся материал по разработке импульсных конденсаторов позволил в предлагаемой книге критически обобщить сведения, опубликованные в отечественной и зарубежной технической литературе.

Автор выражает благодарность проф. Д. М. Казарновскому за ценные замечания, высказанные им при рецензировании рукописи.

Замечания и пожелания просьба посылать по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

1. Особенности изоляционных материалов, применяемых в импульсных конденсаторах

Основными характеристиками диэлектрика конденсаторов являются пробивная напряженность $E_{пр}$, диэлектрическая проницаемость ϵ и потери ($\operatorname{tg} \delta$) на рабочей частоте конденсатора. Величины $E_{пр}$ и ϵ определяют удельную энергию конденсатора, а $\operatorname{tg} \delta$ — тепловой режим конденсатора, особенно существенный для часто повторяющихся колебательных импульсов, и в некоторых случаях — добротность Q (декремент колебания Δ) колебательного контура. Частота колебательных импульсов, при которых могут работать конденсаторы в генераторах импульсных токов, обычно находится в диапазоне 10^4 — 10^7 гц.

В силовых импульсных конденсаторах высокого напряжения для создания тонких слоев диэлектрика (порядка десятков микрон) между обкладками фольги применяется главным образом конденсаторная бумага или пленочные изоляционные материалы, высушенные и пропитанные жидким диэлектриком под вакуумом. Вакуумная сушка применяется для удаления влаги, а пропитка производится для замены воздуха, находящегося в порах бумаги или между слоями пленочных диэлектриков, жидким диэлектриком, обладающим более высокими чем у воздуха электрической прочностью и диэлектрической проницаемо-

стью. Пропитка увеличивает электрическую прочность изоляции и повышает напряжение начала частичных разрядов (ч. р.). Окончательные операции сушки и пропитки обычно производятся для полностью собранных конденсаторов.

2. Жидкие диэлектрики

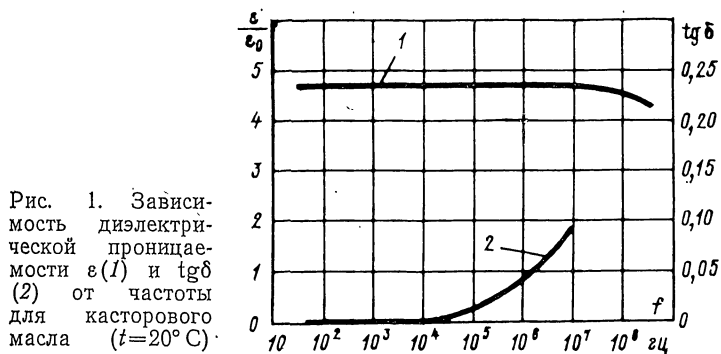
Жидкие диэлектрики, применяемые для пропитки изоляции силовых импульсных конденсаторов, можно разделить на две группы: полярные и неполярные диэлектрики.

Из неполярных жидкостей, которыми пропитывают высоковольтные конденсаторы, работающие в указанном выше диапазоне частот, чаще всего используется нефтяное конденсаторное масло. Конденсаторное масло обладает высокой электрической прочностью. При напряжении 50 гц электрическая прочность равна 250—300 кв/см; $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ масла при температуре 20° С в диапазоне частот 10^4 — 10^7 гц остаются практически неизменными: $\epsilon/\epsilon_0 = 2,2$ — $2,3$, где ϵ_0 — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость пустоты). Рабочий диапазон температур масла лежит в пределах от —40 до +60° С.

Под воздействием частичных разрядов (ч. р.) масло разлагается с выделением водорода и образованием нерастворимых продуктов (Х-воск). Выделение газа может привести к образованию газовых включений, увеличению интенсивности ч. р., развивающихся в этих включениях, и пробое изоляции. Наличие в масле определенного количества ненасыщенных ароматических углеводородов, способных присоединять водород, увеличивает газостойкость масла (снижает газовыделение), однако приводит к возрастанию $\operatorname{tg} \delta$, особенно при высоких температурах.

В импульсных конденсаторах широко используется касторовое масло, являющееся полярным диэлектриком ($\epsilon/\epsilon_0 = 4,5$). Касторовое масло по сравнению с конденсаторным является значительно более стойким против разложения в электрическом поле, что позволяет применять в изоляции более высокие

рабочие напряженности и получать большие значения удельной энергии. Оно обладает более высокой рабочей температурой (рабочий диапазон от -20 до $+85^{\circ}\text{C}$). Касторовое масло, однако, имеет большее значение $\text{tg } \delta$, поэтому может использоваться в конденсаторах с малой частотой следования импульсов. Это масло обладает также более сильной зависимостью ϵ и $\text{tg } \delta$ от частоты — при частоте $f > 10^5$ гц угол потерь заметно растет, а при $f > 10^7$ гц диэлектрическая проницаемость снижается (рис. 1).



Наиболее широко применяемыми полярными пропитывающими жидкостями, наряду с касторовым маслом, являются хлорированные дифенилы: трихлордифенил, пентахлордифенил (совол), пентахлордифенил-трихлорбензол [1, 2]. Все хлорированные дифенилы отличаются повышенными значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon/\epsilon_0=5-6$), что приводит к повышенной ϵ бумаги, пропитанной этими жидкостями ($\epsilon_6/\epsilon_0=5,5-6$). Так же как и касторовое масло, эти жидкости обладают значительно большей стойкостью к воздействию ч. р., чем минеральное масло, хотя хлорированные дифенилы под воздействием ч. р. разлагаются с выделением HCl , которая, воздействуя на бумагу, снижает ее электрическую прочность и придает ей хрупкость за счет укорочения цепочек молекул. Взаимодействие HCl с фольгой приводит к разрушению фольги с образованием AlCl_3 , что заметно проявляется при постоянном напряжении вследствие явлений электролиза.

Бумажная изоляция, пропитанная этими диэлектриками, обеспечивает весьма высокие значения удельной энергии конденсатора, а также их большую долговечность. Однако пропитка хлордифенилами дает заметный эффект для конденсаторов, работающих при частотах до 10^5 гц, так как с дальнейшим ростом частоты диэлектрическая проницаемость бумаги, пропитанной этими жидкостями, заметно снижается.

Кроме пентахлордифенила, разработаны другие хлордифенилы: трихлордифенил, дихлордиметилфе-

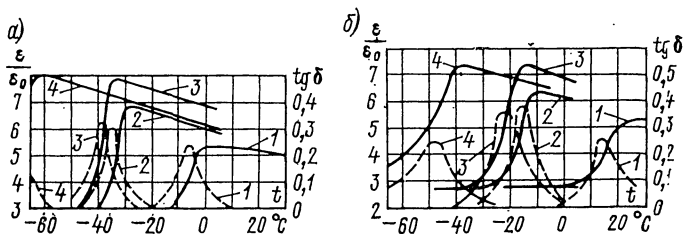


Рис. 2. Зависимость ϵ (сплошные кривые) и $\text{tg } \delta$ (штриховые) от температуры для четырех сортов хлорированных жидкостей при частоте 50 гц (а) и 100 кгц (б)

1 — 1476 (пентахлордифенил); 2 — 1499 (трихлордифенил); 3 — 1500; 4 — 1460

нилиндан (МГ-15), смесь хлордифенила с разбавителем (КЖ-40), смесь трихлорбензола с тетрахлорэтилбензолом в отношении 6:4 по объему (МГТ-4Е). Хлорированные жидкости являются также более стабильными при воздействии повышенных температур.

Зависимости ϵ и $\text{tg } \delta$ от температуры при разных частотах для некоторых хлордифенилов приведены на рис. 2 [1].

Жидкие фторированные углеводороды обладают рядом положительных свойств: невоспламеняемостью, взрывобезопасностью, химической инертностью, высокой нагревостойкостью и хорошими электрическими характеристиками, не уступающими характеристикам конденсаторного масла. Отличительной особенностью ряда фторорганических жидкостей являются низкие значения $\text{tg } \delta$ и стабильность ϵ и $\text{tg } \delta$

в широком диапазоне температур и частот от 10 до 10^7 — 10^8 гц. Недостатками ряда этих жидкостей являются низкое значение ε ($\varepsilon/\varepsilon_0=1,8$ — $1,9$) и большая плотность ($1,65$ г/см³ при 20°C).

Высокой химической и термической стабильностью обладают фторорганические жидкости на основе частично фторированных эфиров, в том числе жидкость PFE-774 с диэлектрической проницаемостью при 20°C $\varepsilon/\varepsilon_0=6,1$. Жидкость может применяться в широком диапазоне температур ($-55\div+85^\circ\text{C}$) и частот, в пределах которых обладает высокой стабильностью своих характеристик (рис. 3).

Для пропитки конденсаторов с изоляцией из синтетических пленок, предназначенных для работы в широком диапазоне температур, применяются жидкие кремнийорганические диэлектрики. Они обладают высокой нагревостойкостью, химической инертностью, низкой температурой застывания, малым температурным коэффициентом вязкости, высокими электрическими характеристиками в весьма широком диапазоне температур от $-70\div-110^\circ\text{C}$ до $+130\div+250^\circ\text{C}$. Жидкости неполярны или слабополярны и имеют $\varepsilon/\varepsilon_0=2,3$ — $2,6$.

Для пропитки нагревостойких пленочных диэлектриков применяется неполярная кремнийорганическая жидкость (полисилоксан), а также жидкости с несколько повышенной диэлектрической проницаемостью: № 2, № 243, № 529. В США для пропитки конденсаторов разработана фторированная кремнийорганическая жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon/\varepsilon_0=7$ и $\text{tg } \delta=6 \cdot 10^{-3}$, а также нитрированная кремнийорганическая жидкость с $\varepsilon/\varepsilon_0=9$ — 14 для диапазона рабочих температур $-90\div+200^\circ\text{C}$ [3].

Основные характеристики жидких диэлектриков, применяемых в импульсном конденсаторостроении, приведены в табл. 2 [1].

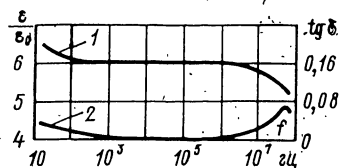


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости ε (1) и $\text{tg } \delta$ (2) для фторированной жидкости PFE-774 от частоты ($t=20^\circ\text{C}$)

**Характеристики основных типов пропиточных масс,
примяемых в конденсаторном производстве**

Название	Плотность, г/см ³	Температура плавления или застывания, °С	$\varepsilon/\varepsilon_0$ при 20° С и 1000 гц	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при 20° С и 1000 гц	ρ_v , ом·см при 100° С
Конденсаторное масло	0,86—0,89	—40 ÷ —45	2,1—2,2	1—2	10^{12} — $3 \cdot 10^{13}$
Вязкое нефтяное масло	0,9—0,91	—5 ÷ —10	2,1—2,2	1—2	10^{12} — $3 \cdot 10^{13}$
Жидкий полисилоксан	0,92—0,95	Ниже —30	2,2—2,4	2—5	$3 \cdot 10^{12}$
Касторовое масло	0,95—0,97	—15 ÷ —17	4,2—4,7	10—15	$2 \cdot 10^{10}$
Трихлордифенил	1,38	—18	5,9	5—10	10^{11} — 10^{12}
Пентахлордифе- нил (совол)	1,54	+5 ÷ +6	5,1	5—10	$3 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12}$
64% пентахлор- дифенила + 36% трихлорбензола	1,51	—35	4,3	5—10	10^{11} — 10^{12}
Фторированный эфир	1,65	—35	6,1	2—5	$5 \cdot 10^{11}$ — 10^{12}

3. Конденсаторная бумага и пленочные диэлектрики

Наиболее распространенным диэлектриком, применяемым в высоковольтных конденсаторах, является электроизоляционная конденсаторная бумага. В отдельных случаях применяется более дешевая кабельная бумага. Бумага обладает высокими значениями электрической и механической прочности и может быть изготовлена в виде гибких лент малой толщины: 5—30 $\mu\text{м}$ — для конденсаторной и 15—240 $\mu\text{м}$ — для кабельной бумаги.

Изоляционная бумага является полярным диэлектриком, что определяется наличием гидроксильных групп ОН в молекулах клетчатки, $\operatorname{tg} \delta$ которой при температуре 20° С и частоте 50 гц равен $(6—7) \cdot 10^{-3}$. Конденсаторная бумага марки КОН-I и КОН-II имеет характеристики, приведенные в табл. 3.

Зависимость диэлектрической проницаемости ε от частоты для конденсаторной бумаги, пропитанной различными жидкими диэлектриками, приведена на рис. 4. Как следует из этого рисунка, в пропитанной

Характеристика сухой неопитанной конденсаторной бумаги

Марка	Плотность, г/см^3	$\text{tg } \delta$ при $60^\circ \text{C, } 50 \text{ гц}$	ϵ/ϵ_0	$E_{\text{пр}}$ при 50 гц, кВ/мм	Теплопровод- ность, кал сек·град·см	Номинальная толщина, мм
КОН-I	1,0	$1,7 \cdot 10^{-3}$	2,2	15—40	$4 \cdot 10^{-4}$	7—30
КОН-II	1,16—1,25	$2 \cdot 10^{-3}$	2,9	18—50	$4 \cdot 10^{-4}$	5—30

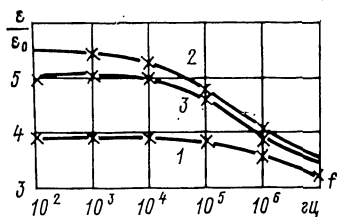


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для конденсаторной бумаги КОН-II ($t=20^\circ \text{C}$)

1 — пропитка конденсаторным маслом; 2 — пропитка соловом; 3 — пропитка касторовым маслом

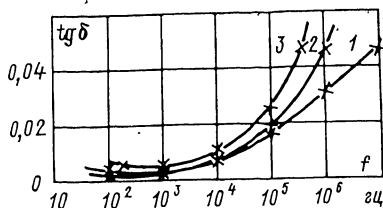


Рис. 5. Зависимость $\text{tg } \delta$ от частоты для конденсаторной бумаги КОН-II ($t=20^\circ \text{C}$)

1 — пропитка конденсаторным маслом; 2 — пропитка соловом; 3 — пропитка касторовым маслом

конденсаторным маслом конденсаторной бумаге ϵ практически не зависит от частоты f до 10^5 гц. При частоте 10^6 гц происходит снижение диэлектрической проницаемости на 5—6%, а при частотах 10^7 гц — на 10%. Для полярных жидких диэлектриков снижение ϵ с ростом частоты более заметно и при частоте 10^6 гц достигает 20—30%. Это приводит к соответствующему снижению емкости конденсатора при указанных частотах.

На рис. 5 приведена зависимость $\text{tg } \delta$ от частоты для пропитанной маслом конденсаторной бумаги. С ростом частоты происходит существенное увеличение $\text{tg } \delta$ преимущественно за счет потерь в клетчатке. Если для бумаги, пропитанной конденсатор-

ным маслом, при частоте 50 гц $\operatorname{tg} \delta = 0,002$, то при частоте $3 \cdot 10^6$ гц его величина возрастает до 0,04. Соответственно будут увеличиваться потери и выделение энергии внутри конденсатора.

Изоляционная бумага имеет высокую электрическую прочность. При больших площадях электродов (фольги в конденсаторных секциях) порядка 10^4 см^2 $E_{\text{пр}} = 200\text{—}250 \text{ кВ/мм}$ для конденсаторной; $100\text{—}120 \text{ кВ/мм}$ — для кабельной бумаги.

Использование тонких слоев изоляции $30\text{—}100 \text{ мкм}$ позволяет существенно повысить напряженность появления ч. р. в изоляции и применять в импульсных бумажных конденсаторах весьма высокие рабочие напряженности: $60\text{—}80 \text{ кВ/мм}$, а в отдельных режимах — до 120 кВ/мм .

Возможность повышения диэлектрической проницаемости сухой бумаги ограничена и в основном определяется возможностью повышения плотности бумаги. Для анализа электрических свойств бумаги, учитывая последовательное чередование слоев клетчатки и разделяющих их пор, целесообразно применить схему замещения, изображенную на рис. 6 [1]. В соответствии со схемой эквивалентная диэлектрическая проницаемость может быть представлена в виде:

$$\epsilon_6 = \frac{\frac{\epsilon_K}{1-a} + \frac{\epsilon_{\Pi}}{a}}{\frac{\epsilon_K}{1-a} + \frac{\epsilon_{\Pi}}{a}} = \frac{\epsilon_K \epsilon_{\Pi}}{\epsilon_{\Pi} (1-a) + \epsilon_K a}, \quad (1)$$

где ϵ_K и ϵ_{Π} — соответственно диэлектрическая проницаемость клетчатки и пропитывающего состава; a — относительный объем, занимаемый порами. Величина a определяется плотностью бумаги γ . Если обозначить γ_K — плотность клетчатки, то

$$a = 1 - \gamma / \gamma_K. \quad (2)$$

Клетчатка имеет $\epsilon_K / \epsilon_0 = 6,6$; $\operatorname{tg} \delta_K = (6\text{—}7) \cdot 10^{-3}$ при 20°С и 50 гц и $\gamma_K = 1,55 \text{ г/см}^3$.

Для непротитанной бумаги $\epsilon_{\Pi} = \epsilon_0$ и

$$\frac{\epsilon_6}{\epsilon_0} = \epsilon_{r6} = \frac{\epsilon_K / \epsilon_0}{1 + a \left(\frac{\epsilon_K}{\epsilon_0} - 1 \right)} = \frac{\epsilon_{rK}}{1 + a (\epsilon_{rK} - 1)}, \quad (3)$$

где $\epsilon_{rk} = \epsilon_k / \epsilon_0$ — относительная диэлектрическая проницаемость клетчатки.

При пропитке бумаги поры заполняются пропитывающей жидкостью. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги от диэлектрической проницаемости пропитывающей жидкости представлена на рис. 7. Как следует из этого рисунка и формулы (1), с ростом ϵ_{Π} величина ϵ_{δ} растет нелинейно, стремясь к некоторому значению при

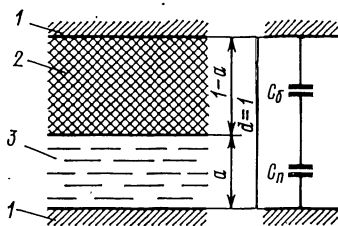


Рис. 6. Эквивалентная схема замещения бумажной изоляции
1 — электроды; 2 — клетчатка; 3 — пропитывающий состав

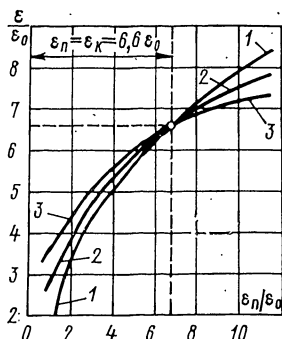


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги различной плотности от диэлектрической проницаемости пропитывающей жидкости
1 — 0,8 г/см³; 2 — 1,0 г/см³; 3 — 1,2 г/см³

$\epsilon_{\Pi} \rightarrow \infty$; $\lim_{\epsilon_k \rightarrow \infty} \epsilon_{r\delta} = \frac{\epsilon_{rk}}{1-a}$. Для бумаги КОН-I, имеющей $a=0,35$, $\epsilon_{r\delta}$ при $\epsilon_{\Pi} \rightarrow \infty$ будет равно 10, а для бумаги КОН-II ($a=0,22$) соответственно 8,5.

Как следует из рис. 7, эффективность увеличения ϵ_{δ} за счет роста ϵ_{Π} имеет предел. При увеличении диэлектрической проницаемости пропитывающего состава $\epsilon_{\Pi}/\epsilon_0$ от 4 до 16 ϵ_{δ} возрастает примерно на 40%; дальнейшее увеличение ϵ_{Π} приводит к весьма незначительному возрастанию ϵ_{δ} .

Для изготовления конденсаторов повышенной добротности, предназначенных для работы при частотах от 10^6 гц и выше, применяются пленки из синтетических неполярных диэлектриков, таких как поли-

стирол, полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт-4), полипропилен.

В настоящее время разработан ряд новых пленочных материалов. Пленка «САМП» из сополимера на основе полистирола имеет $\varepsilon/\varepsilon_0=2$, повышенную по сравнению с обычной полистирольной пленкой рабочую температуру до $100-105^\circ\text{C}$ и достаточно малый $\text{tg } \delta=4 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и 50 гц. Пленка на основе фторированного сополимера этилен-пропилена (Teflon FER, США) обладает устойчивыми характеристиками в широком диапазоне температур (от -240 до $+200^\circ\text{C}$) и имеет $\varepsilon/\varepsilon_0=2$, $\text{tg } \delta=2 \cdot 10^{-4}$ и $\rho_v=10^{18} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 20°C .

Некоторые характеристики неполярных пленок приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики неполярных пленок и изготовленных из них конденсаторов

Наименование характеристик	Полистирол	Полиэтилен	Политетрафторэтилен (фторопласт-4)	Полипропилен
Относительная диэлектрическая проницаемость пленки при 20°C и 60 гц .	2,58	2,25	2,05	2,25
То же при 20°C и 1 Мгц .	2,58	2,25	2,05	2,25
Тангенс угла потерь пленки при 20°C и 60 гц . . .	$(2-3) \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$(1-5) \cdot 10^{-4}$	$(3-5) \cdot 10^{-4}$
То же при 20°C и 1 Мгц . .	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	$(2-3) \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление пленки при 20°C , ом·см	$10^{18}-10^{19}$	$10^{17}-10^{18}$	выше 10^{18}	10^{17}
Емкость конденсатора при 85°C в % от емкости при 25°C	99	96	99	97,8
Изменение емкости после хранения в течение года, %	0,1—0,2	0,3—0,5	0,2—0,3	—
Постоянная времени конденсаторов (Мом·мкф) при 20°C и 250 в	более 10^6	10^5	10^6	10^5
То же при 85°C	10^4-10^5	10^3	10^4-10^5	10^3
Стойкость пленки к короне при толщине 110 мкм 24 кв/мм, 50 гц (время до пробоя, ч)	75	60	6	—
Предел рабочей температуры конденсаторов, $^\circ\text{C}$. .	$-60-+85$	$-60-+70$	$-60-+250$	$-20-+75$
Плотность, г/см ³	1,05	0,92	2,2	0,92

Как видно из приведенных данных, неполярные пленки обладают низким $\operatorname{tg} \delta$, порядка $(1-4) \cdot 10^{-4}$, высоким удельным объемным сопротивлением ($\rho_v = 10^{17}-10^{18} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 20°C) и небольшой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon/\epsilon_0 = 2 \div 2,5$). При этом значения ϵ/ϵ_0 и $\operatorname{tg} \delta$ практически не изменяются при из-

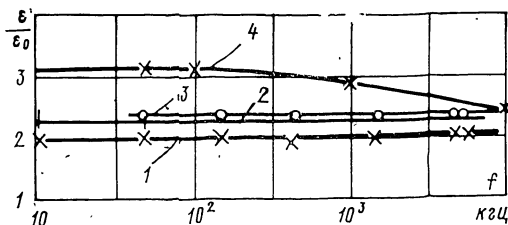


Рис. 8. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для синтетических пленок

1 — фторопласт-4; 2 — полистирол; 3 — полиэтилен; 4 — полиэтилентерефталат (лавсан)

менении частоты приложенного напряжения до 10^7 гц (рис. 8, 9).

Большинство пленок обладает весьма высокой электрической прочностью (на постоянном напряжении при больших площадях электродов 300—400 кВ/мм).

Однако наиболее широко применяемые пленки (полистирол, полиэтилен) обладают низкой теплостойкостью. Пленки на основе фторопласта нетехнологичны в изготовлении и имеют высокую стоимость. Обычно неполярные пленки целесообразно применять в тех случаях, когда требуется высокая добротность конденсатора (малые потери) при частотах от 10^6 гц и выше.

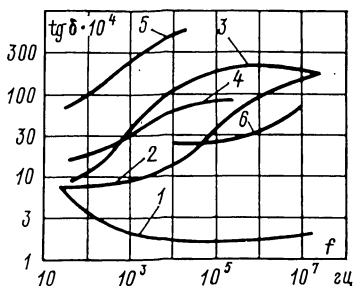


Рис. 9. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для синтетических пленок ($t=20^\circ \text{C}$)

1 — полистирол; 2 — поликарбонат; 3 — полиэтилентерефталат (лавсан); 4 — каптан; 5 — триацетат целлюлозы; 6 — полиэтиленово-бумажная изоляция (30 мм бумаги, 80 мм полиэтиленовой пленки, пропитка минеральным маслом)

В тех случаях, когда к конденсаторам не предъявляется особо жестких требований по добротности, целесообразно применять полярные пленки. Несмотря на то, что ряд полярных пленок имеет более низкую диэлектрическую проницаемость, чем бумага, пропитанная полярными жидкостями (для пленок $\epsilon/\epsilon_0 \approx 3,5$), они обладают более высокой электрической прочностью при больших площадях электродов, что объясняется большой однородностью. Это позволяет применять в конденсаторах более высокие рабочие напряженности, что компенсирует уменьшение диэлектрической проницаемости и позволяет получать конденсаторы с более высокой удельной энергией.

Наиболее широко используемой является полиэтилентерефталатная пленка (в СССР эта пленка известна под названием лавсановой, в США — майлар, в ФРГ — хостафан, в Италии — монтивель, в Англии — мелинекс, терилен). Эта пленка может быть получена толщиной до 6 $\mu\text{м}$; относительная диэлектрическая проницаемость при 50 гц $\epsilon/\epsilon_0 = 3,2$ и $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$. Диэлектрическая проницаемость существенно падает при увеличении частоты выше 10^6 гц , а $\text{tg } \delta$ растет при увеличении частоты выше 1 кгц (рис. 8 и 9). Допустимая рабочая температура лежит в пределах $-60 \div +130^\circ \text{C}$. Электрическая прочность приблизительно в 1,5—2 раза выше, чем прочность пропитанной конденсаторной бумаги.

На основе взаимодействия терефталевой кислоты и 1,4-циклогександиметанола получен полиэфир, близкий к полиэтилентерефталату, но превосходящий его по ряду свойств [4]. Пленка из этого полиэфира — терафильм Т-16 — имеет ослабленную зависимость ϵ от температуры, а рост $\text{tg } \delta$ начинается при более высоких частотах.

Поликарбонатная пленка является полимером на основе эфиров угольной кислоты. Температура плавления этой пленки лежит в пределах $220\text{—}350^\circ \text{C}$. При температуре ниже -100°C пленка приобретает хрупкость. Пленка выпускается толщиной от 20 $\mu\text{м}$ и более. Верхний предел рабочей температуры $120\text{—}130^\circ \text{C}$. Пленка имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon/\epsilon_0 \approx 3$ и малые диэлектрические потери в диапазоне рабочих температур $-50 \div +150^\circ \text{C}$.

при частотах 10^2 — 10^6 гц $\operatorname{tg} \delta$ колеблется в пределах 10^{-3} — 10^{-2} .

Полиимидные пленки (H-film) получают на основе высокомолекулярных соединений, в которых высокое содержание бензольных колец в материале способствует высокой нагревостойкости и радиационной стойкости. Пленка имеет $\epsilon/\epsilon_0 \approx 3,5$, $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ при

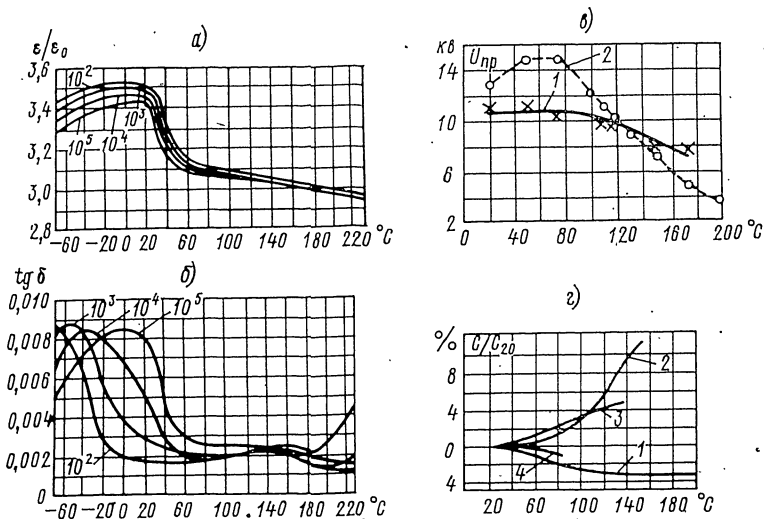


Рис. 10. Характеристики полиимидной пленки (H=film): а — зависимость ϵ/ϵ_0 от температуры при разных частотах (значения f в герцах указаны у кривых); б — зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры при различных частотах (значения f в гц указаны у кривых); в — зависимость $U_{пр}$ от температуры для пленок H=film (1) и майлар (2) толщина пленок 30 мкм; г — зависимость изменения емкости C (в % от C при 20°С) от температуры для конденсаторов с диэлектриком из пленки H=film (1), майлара (2), бумаги (3), полистирола (4)

20°С и $f=1$ кГц. Температура плавления пленки около 800°С. Характеристики пленки приведены на рис. 10. Плотность пленки 1,42 г/см³. Пленка изготавливается толщиной от 25 до 125 мкм. Длительно допускаемая рабочая температура может достигать +300°С. Пленка обладает исключительно высокой стойкостью к воздействию отрицательных температур.

При температуре жидкого азота относительное удлинение пленки составляет 50% (при нормальной температуре — 70%, при 200°С — 90%). При температуре 4°К пленка может быть изогнута вокруг стержня диаметром 3 мм без появления в ней трещин [5, 6].

Пленки на основе эфиров целлюлозы получают в результате взаимодействия целлюлозы с кислотами и спиртами. Эфиры легко растворимы в ряде органических растворителей, что позволяет получать пленки

методом отливки из раствора. Триацетатная пленка при обычной технологии выпускается толщиной от 12—15 мкм и выше. Пленка имеет рабочую температуру +85°С; $\epsilon/\epsilon_0 = 3,5—3,9$; $\text{tg } \delta = (5—7) \cdot 10^{-3}$ при $t = 20^\circ\text{C}$ и $f = 1 \text{ кгц}$. Пленка применяется также в лакопленочных конденсаторах при толщинах 1—3 мкм.

Цианэтилцеллюлозная пленка получается из эфира целлюлозы и в зависимости от степени замещения гидроксильных (моно-, ди- или трицианат)

полярной группой $\text{CH}_2—\text{CH}_2—\text{CN}$ может иметь относительную диэлектрическую проницаемость от 10 до 15. Пленка имеет существенную зависимость ϵ от температуры и частоты (рис. 11), причем при 20°С при изменении частоты от 50 до 10^6 гц ϵ уменьшается в 2 раза. Пленка обладает повышенным $\text{tg } \delta$ и низким удельным сопротивлением ($\rho_v = 10^{10}$ при 20°С) на 6—8 порядков ниже, чем для других пленочных диэлектриков, что затрудняет использование этой пленки в конденсаторах.

Характеристики полярных пленок приведены в табл. 5.

В конденсаторах с синтетическими пленками без пропитки жидкими диэлектриками разрушение твердого диэлектрика начинается при развитии частичных

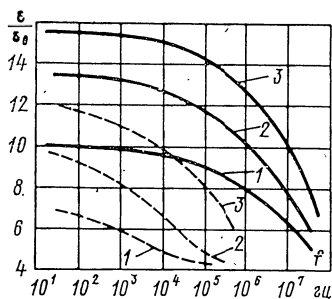


Рис. 11. Зависимость ϵ от частоты для этилцеллюлозы при +20°С (сплошные кривые) и —53°С (штриховые). 1 — моно-, 2 — ди-, 3 — трициан-этилцеллюлоза

Таблица 5

Характеристика полярных пленок

Наименование	Плотность, g/cm^3	Временное сопротивление на разрыв, kg/cm^2	Пределы рабочих температур, $^{\circ}C$	ϵ/ϵ_0 при $t = 20^{\circ}C$		$tg \delta \cdot 10^3$ при $t = 20^{\circ}C$	ρ_{φ} ($20^{\circ}C$), $ом \cdot см$	$E_{пр}$ $20^{\circ}C$, $50 гц$, $кв/мм$
				1 $кГц$	1 $МГц$	1 $кГц$	1 $МГц$	
Полиэтилентерфталат (лавсан)	1,4	1600—2000	—60+125	3,2	3,1	4—5	18—20	160
Полициклоксандиметилтерфталат (Т16)	1,22	1000—1500	—50+140	3,1	3,1	4—5	10	160
Поликарбонат	1,2—1,24	600—700	—20+140	3,1	3,0	0,8—1,2	15	100—160
Полиимид	1,42	1200—1500	—270+230÷300	3—3,5	3—3,4	2—3	10	240
Полиарилат	—	500—900	+150÷175	3—3,5	—	4—5	10 ¹⁷	100
Триацетат целлюлозы	1,2	900—1200	—60+80÷105	3,5—3,7	3,3—3,5	5—7	15	160—200
Циантилцеллюлоза	1,2	350—400	—50+65	10—15	5—7	10—25	50—100	160
Политрихлорфторэтилен	2,2	—	—195+100	3,0	2,5—2,7	15	10	160—200

разрядов (ч. р.) в воздушных включениях между листами. Это приводит к снижению электрической прочности пленок с ростом частоты [7]. Для повышения напряжения начала ч. р. и улучшения электрической прочности как бумажные, так и пленочные конденсаторы пропитывают жидкими диэлектриками. В ряде случаев для улучшения характеристик диэлектрика (повышения электрической прочности и напряжения начала ч. р., уменьшения диэлектрических потерь и увеличения объемного сопротивления изоляции) используют комбинированную пленочно-бумажную изоляцию, состоящую из чередующихся слоев конденсаторной бумаги и пленки.

В пленочно-бумажной изоляции значительно улучшаются процессы вакуумной пропитки, так как бумага служит фитилем, втягивающим пропитывающий состав, и полностью устраняет возможные газовые включения между слоями изоляции. В результате удается повысить допустимые напряженности электрического поля (до 150—200 $кв/мм$). Такая изоляция обладает, кроме того,

значительно более высоким объемным сопротивлением (при 20°С порядка $3 \cdot 10^4$ *Мом·мкф*) и малым током утечки, что особенно важно при заряде батарей большой емкости.

Применением неполярных пленок удастся существенно уменьшить потери в комбинированном диэлектрике при высоких частотах (порядка 1 *Мгц*) по сравнению с бумагой (см. рис. 9). В этом случае эквивалентные значения $\text{tg } \delta_{\text{экв}}$ и $\epsilon_{\text{экв}}$ зависят от соотношения между объемами, занимаемыми пленкой и бумагой [8],

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{\epsilon_{\text{б}} \epsilon_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{б}} \frac{d_{\text{п}}}{d} + \epsilon_{\text{п}} \frac{d_{\text{б}}}{d}}; \quad (4)$$

$$\text{tg } \delta_{\text{экв}} = \text{tg } \delta_{\text{п}} \frac{\epsilon_{\text{б}}}{\epsilon_{\text{п}} \frac{d_{\text{б}}}{d_{\text{п}}} + \epsilon_{\text{б}}} + \text{tg } \delta_{\text{б}} \frac{\epsilon_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{п}} + \epsilon_{\text{б}} \frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{б}}}}, \quad (5)$$

где $\epsilon_{\text{п}}$ и $\text{tg } \delta_{\text{п}}$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь пленочного диэлектрика с суммарной толщиной $d_{\text{п}}$; $\epsilon_{\text{б}}$, $\text{tg } \delta_{\text{б}}$ и $d_{\text{б}}$ — соответственно то же для бумажного диэлектрика. Так, например, для изоляции из трех листов бумаги КОН-II 10 *мкм* и двух листов полиэтилена по 40 *мкм* (пропитка нефтяным маслом) при $f=1$ *Мгц* имеем: $\text{tg } \delta_{\text{п}}=4 \cdot 10^{-4}$; $\text{tg } \delta_{\text{б}}=3 \cdot 10^{-2}$ и $\text{tg } \delta_{\text{экв}}=5 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в комбинированном диэлектрике потери приблизительно на порядок меньше по сравнению с бумажной изоляцией при сохранении достаточной электрической прочности. Такой диэлектрик необходим для конденсаторов с повышенной добротностью (около 100), работающих при частотах порядка 1 *Мгц* и выше [9].

Следует, однако, иметь в виду, что потери в комбинированном диэлектрике приблизительно на порядок выше, чем в неполярных пленках. Поэтому для конденсаторов с добротностью выше 100 комбинированный диэлектрик непригоден. В них применяется изоляция только из неполярных пленок с пропиткой нефтяным маслом.

УСЛОВИЯ РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ МНОГОКРАТНЫХ РАЗРЯДАХ

4. Факторы, определяющие допустимые рабочие напряженности

Для конденсаторов в генераторах больших импульсных токов, работающих при малом числе импульсов в единицу времени (порядка нескольких импульсов в минуту и менее), тепловой пробой практически исключен, и срок жизни конденсатора определяется в основном процессами электрического старения.

В этом случае допустимая величина рабочей напряженности определяется следующими факторами: 1) возможностью сквозного пробоя секций конденсатора и 2) возможностью разрушения изоляции частичными разрядами (ч. р.). При большей повторяемости импульсов (порядка нескольких импульсов в секунду и выше) конденсатор может выйти из строя вследствие перегрева за счет потерь, выделяемых как в диэлектрике конденсатора, так и в токоведущих его элементах, и развития теплового пробоя. Каждый из этих факторов может явиться определяющим при выборе допустимой рабочей напряженности.

5. Кратковременная электрическая прочность изоляции конденсаторов

В листе конденсаторной бумаги всегда имеются проводящие включения, размеры которых соизмеримы с толщиной листа, состоящие в основном из частиц металлов, их солей и окислов. Число таких включений зависит от толщины листа и для бумаг толщиной 10—12 мкм составляет 50—100 на квадратный метр поверхности.

Если толщина диэлектрика равна двум листам, то электрическая прочность его будет определяться только одним листом конденсаторной бумаги. Вероят-

ность совпадения двух включений в различных листах при ограниченной площади электродов достаточно мала, поэтому можно считать, что каждое проводящее включение шунтирует только один лист бумаги. При этом пробой происходит в месте расположения включения, что большей частью соответствует области равномерного поля.

Аналогично пробивное напряжение $U_{пр}$ трех листов будет определяться электрической прочностью двух листов; для четырех листов — прочностью трех листов и т. д. Таким образом,

$$U_{пр} = E_{0б} (n-1) \delta_б, \quad (6)$$

где $E_{0б}$ — пробивная напряженность листа бумаги при отсутствии включений; $\delta_б$ — толщина одного листа бумаги; n — число листов в слое изоляции.

Средняя пробивная напряженность

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{n\delta_б} = E_{0б} \frac{n-1}{n}. \quad (7)$$

Наличие проводящих включений в слое большей частью приводит к пробое изоляции в области равномерного поля. Однако, если число листов больше семи-восьми, то начинает сказываться краевой эффект электрода (обкладки). Напряженность поля на поверхности обкладки с радиусом закругления r , при $r \ll d$ может быть оценена по формуле:

$$E_{\max} = \frac{U}{\sqrt{\pi d r}} = E_{ср} \sqrt{\frac{d}{\pi r}}, \quad (8)$$

где $E_{ср} = U/d$ — средняя напряженность; d — толщина диэлектрика.

По мере увеличения толщины диэлектрика проводящие включения сказываются все меньше [($n-1$)/ n близко к единице], и пробой будут более вероятны на краю электрода, где искажение поля будет наибольшим. Это приводит к тому, что с ростом d при заданной толщине обкладки (эквивалентном радиусе закругления ее края) возрастает степень неоднородности поля $E_{\max}/E_{ср}$ и падает средняя пробивная напряженность.

Вследствие суммирования обоих рассмотренных выше обстоятельств возникает максимум пробивной

напряженности (рис. 12) при толщине слоя 40—80 мкм (число слоев 4—8). Число листов, соответствующее максимуму пробивной напряженности, несколько зависит от площади электродов, смещаясь при увеличении площади в сторону большего количества листов.

В ряде случаев желательно выбрать такую толщину диэлектрика, при которой пробивная напряженность была бы наибольшей. Этому соответствует толщина изоляции секций конденсаторов в 7—10 листов при толщине листа 10—12 мкм.

С ростом площади электродов возрастает вероятность совпадений включений в двух и более листах, что может привести к еще более значительному снижению электрической прочности. Вероятность k -кратного (и более) совпадения в листах бумаги с площадью электродов S [10]

$$p_k = 1 - [1 - (p_0 S_0)^{k-1}]^{p_0 S C_k^n}, \quad (9)$$

где p_0 — вероятность попадания проводящей частицы на 1 см² площади листа бумаги; S_0 — эффективная площадь включения ($S_0 \approx 0,01—0,02$ см²). При этом средняя пробивная напряженность секции

$$\begin{aligned} E_{\text{пр}} = & (1 - p_1) E_{06} + (p_1 - p_2) \frac{n-1}{n} E_{06} + \\ & + (p_2 - p_3) \frac{n-2}{n} E_{06} + \dots + (p_k - p_{k+1}) \frac{n-k}{n} E_{06} + \\ & + (p_{n-1} - p_n) \frac{1}{n} E_{06} = \sum_{k=1}^{n-1} (p_k - p_{k+1}) \frac{n-k}{n} E_{06}. \end{aligned} \quad (10)$$

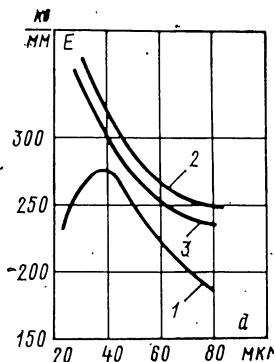


Рис. 12. Зависимость пробивной напряженности E от толщины d изоляции. Постоянное напряжение

1 — конденсаторная бумага 10 мкм, пропитанная касторовым маслом; 2 — полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка; 3 — бумажно-лавсановая изоляция, 50% бумаги

На рис. 13 приведены зависимости дополнительного количества листов, необходимого в изоляции секций для обеспечения неизменной средней электрической прочности изоляции от площади электродов при разном числе листов n в образцах малой площади S_1 . Как видно из этих кривых, при увеличении площади электродов, например с 1 до 10^4 см² ($m =$

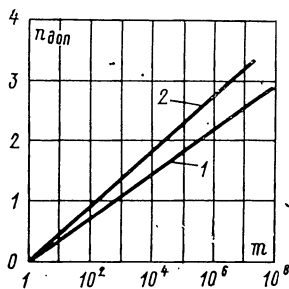


Рис. 13. Зависимость дополнительного количества листов $n_{доп}$ в изоляции секций для сохранения неизменной электрической прочности от относительного увеличения площади электродов $m = S_m/S_1$, для различного количества листов n в изоляции с площадью S_1

1 — $n=2$ листа; 2 — $n=8$ листов

$= S_m/S_1 = 10^4$), для сохранения неизменной средней пробивной напряженности необходимо увеличить количество листов в изоляции секций приблизительно на два.

Кроме кратковременной электрической прочности, для изоляции весьма важен разброс пробивных напряжений отдельных образцов. При увеличении этого разброса в процессе массового производства изделий возрастает вероятность появления образцов с ослабленной изоляцией. На рис. 14 приведены функции распределения образцов по пробивным напряжениям при различном числе листов конденсаторной бумаги в изоляции секций. Сравнение приведенных кривых показывает, что разброс пробивных напряжений конденсаторной изоляции из бу-

маги 10 мкм с числом листов, равным 5—7, имеет среднеквадратичное отклонение порядка 6—8%. Существенное увеличение разброса в пробивных напряжениях наступает при числе листов менее пяти. Уменьшение электрической прочности и увеличение разброса пробивных напряжений при уменьшении числа листов в слое менее пяти приводит к необходимости либо снижения допустимых напряженностей, либо применения специальных мер по изъятию секций с пониженной электрической прочностью (применение плавких вставок для секции в конденсаторах с параллельным

их соединением, отбраковка секций повышенным напряжением перед сборкой конденсаторов и др.).

Изоляция на основе синтетических пленок обладает более высокой кратковременной прочностью, особенно при малых толщинах (20—30 мкм) даже при больших площадях электродов, что объясняется большей однородностью структуры этих пленок.

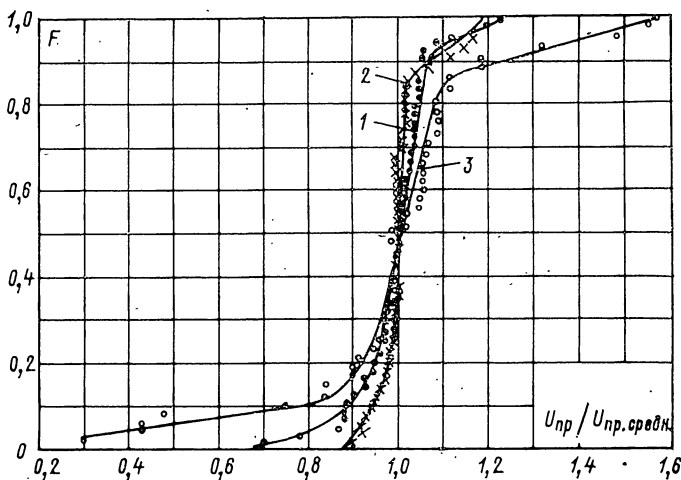


Рис. 14. Функции распределения пробивных напряжений для конденсаторной бумаги 12 мкм

1 — $n=7$ листов; 2 — $n=5$ листов; 3 — $n=3$ листа

Зависимости, приведенные на рис. 12, показывают, что для бумажно-пленочного 3 и пленочного диэлектрика 2 не происходит уменьшения кратковременной электрической прочности в области малых толщин, как для бумажной изоляции 1. Рост электрической прочности происходит при уменьшении толщины до 20—30 мкм. При этом абсолютные значения электрической прочности при малых толщинах (30 мкм) примерно в два раза выше, чем для бумажной изоляции.

Как показывают эти результаты, наилучшее использование бумажно-пленочного и пленочного диэлектрика достигается при уменьшенной его толщине порядка 30—40 мкм. В то же время при тол-

щине 80 мкм электрическая прочность комбинированного бумажно-пленочного и пленочного диэлектрика падает и приближается к прочности бумажного диэлектрика, т. е. преимущества пленки как однородного диэлектрика при больших толщинах (большом числе листов) проявляются слабее.

Для всех видов изоляции электрическая прочность изоляции секций зависит от площади обкладок (электродов). Это объясняется статистическими особенностями развития пробоя. С ростом площади электродов увеличивается вероятность пробоя образцов при напряжении не больше заданного.

Если F_1 — вероятность пробоя образца с площадью электродов S_1 при напряжении не более U , F_m — вероятность пробоя образца с площадью электродов $S_m = mS_1$, при том же напряжении, то

$$F_m = 1 - (1 - F_1)^m. \quad (11)$$

В большинстве случаев можно принять, что распределение пробивных напряжений подчиняется нормальному закону. При этом функция распределения образцов по пробивным напряжениям (вероятность того, что пробивное напряжение будет меньше или равно U) может быть представлена в виде

$$F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^U \exp \left[-\frac{(U - U_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2} \right] dU, \quad (12)$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее пробивное напряжение образцов заданной конструкции; σ — среднеквадратичное отклонение пробивных напряжений этих образцов.

Если обозначить: $U_{\text{ср}1}$ — среднее или 50%-ное пробивное напряжение для площади S_1 ; $U_{\text{ср}m}$ — среднее или 50%-ное пробивное напряжение для площади $S_m = mS_1$; σ_1 и σ_m — среднеквадратичные отклонения пробивных напряжений соответственно для площадей S_1 и S_m , то

$$U_{\text{ср}1} - U_{\text{ср}m} = a\sigma_1 \quad (13)$$

и

$$\sigma_m = b\sigma_1, \quad (14)$$

где a и b являются функциями m :

m	1	10	10^2	10^3	10^4
a	0	1,54	2,50	3,25	3,85
b	1	0,59	0,43	0,35	0,30

Как следует из формул (13) и (14), с ростом площади электродов уменьшается пробивное напряжение и уменьшается также его среднеквадратичное отклонение (разброс).

6. Разряд по закраине

В конденсаторах вблизи края фольги имеет место резко неоднородное поле (рис. 15) с большой нормальной и тангенциальной составляющими напря-

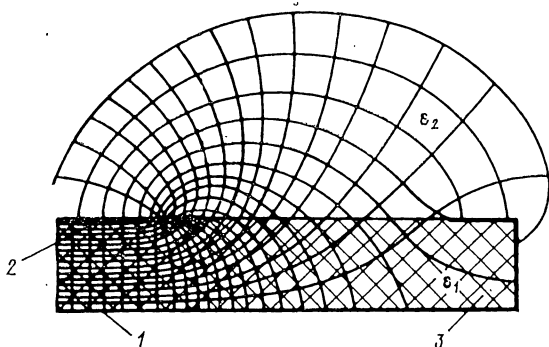


Рис. 15. Картина поля на краю электрода при значительной емкости поверхности диэлектрика на один из электродов, $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$

1 и 2 — электроды; 3 — твердый диэлектрик

женности. Такая конфигурация поля существенно облегчает развитие разряда вдоль закраины по поверхности диэлектрика. В этом случае при возрастании напряжения до определенной величины на краю электрода возникает коронный разряд, интенсивность которого увеличивается с ростом напряжения. В дальнейшем развивается скользящий разряд (неполный поверхностный разряд), переходящий в перекрытие по поверхности диэлектрика.

В соответствии с [11], эквивалентная схема замещения диэлектрика на краю электродов может быть представлена согласно рис. 16, где C_1 — емкость единицы поверхности диэлектрика относительно нижнего электрода 1; C_2 — взаимная емкость соседних единиц

поверхности диэлектрика относительно друг друга; d — толщина диэлектрика; R_1 — активное сопротивление столба диэлектрика высотой d и площадью, равной единице поверхности; $R_2 = \rho_s$ — удельное поверхностное сопротивление диэлектрика.

Если ρ_v — удельное объемное сопротивление диэлектрика, то

$$R_1 = \rho_v d. \quad (15)$$

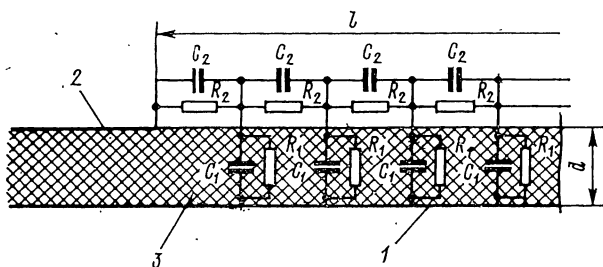


Рис. 16. Эквивалентная схема замещения диэлектрика на краю электрода

1 и 2 — электроды; 3 — твердый диэлектрик

При переменном напряжении величина ρ_v главным образом определяется потерями в диэлектрике ($\operatorname{tg} \delta$) и

$$\rho_v = \frac{1}{\omega \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta}, \quad (16)$$

где ε_1 — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ω — угловая частота приложенного напряжения.

Кроме того, $C_1 = \varepsilon_1/d$ и $C_2 = k\varepsilon_2$, где k — постоянная, учитывающая форму поля; ε_2 — диэлектрическая проницаемость среды.

Наибольшая напряженность вдоль поверхности диэлектрика возникает у угла верхнего электрода 2

$$E_{xm} = Um \operatorname{cth} ml, \quad (17)$$

где $m = \sqrt{Z_2 Y_1}$; $\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + j\omega C_2$; $Y_1 = \frac{1}{\rho_v d} + j\omega C_1$; l — длина закраины.

Для постоянного напряжения емкостные проводимости равны нулю, и поэтому

$$m = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_v d}}. \quad (18)$$

Для переменного напряжения достаточно высокой частоты, при которой $\frac{1}{R_2} \ll \omega C_2$, и импульсного напряжения

$$m \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{k \varepsilon_2 d}}. \quad (19)$$

Можно считать, что скользящий разряд возникает при таком напряжении $U_{ск}$, при котором величина $E_{хт}$ достигнет некоторой критической величины E_0 , соответствующей электрической прочности жидкости диэлектрика, окружающего верхний электрод. При этом

$$U_{ск} = \frac{E_0}{m} \operatorname{th} ml. \quad (20)$$

Если $l \gg d$, то $ml > 10$ и $\operatorname{th} ml \approx 1$. Тогда $U_{ск} = E_0/m$. Для постоянного напряжения

$$U_{ск} = E_0 \sqrt{\frac{\rho_v d}{\rho_s}} \quad \text{и} \quad E_{ск} = \frac{U_{ск}}{d} = E_0 \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_s d}} \quad (21)$$

и для переменного и импульсного напряжений

$$U_{ск} = E_0 \sqrt{\frac{k \varepsilon_2 d}{\varepsilon_1}} \quad \text{и} \quad E_{ск} = \frac{U_{ск}}{d} = E_0 \sqrt{\frac{k \varepsilon_2}{\varepsilon_1 d}}. \quad (22)$$

Таким образом, средняя напряженность скользящего разряда (и аналогично — коронного разряда) изменяется пропорционально $1/\sqrt{d}$. Это следует также из формулы (8).

При расположении электродов по рис. 15, если длина скользящего разряда достигнет длины закраины l , происходит разряд по поверхности. Зависимость разрядного напряжения от длины закраины приведена на рис. 17. Для переменного и импульсного напряжения разрядное напряжение увеличивается с ростом толщины диэлектрика. Для $l < 2 \text{ см}$

$$U_{пр} = A l^{0.5}, \quad (23)$$

где A — постоянная, зависящая от толщины диэлектрика. Так, например, для $d = 0,1 \text{ мм}$ амплитудное

значение напряжения $U_{\text{прт}} = 10^{10,5}$. Здесь $U_{\text{прт}}$ — в кВ; l — в см.

Для постоянного напряжения величины разрядных напряжений больше и весьма слабо зависят от толщины диэлектрика.

При изготовлении секций с выступающей фольгой длина разрядного промежутка на поверхности изоляции соответствует длине закраины.

Для секций со скрытой фольгой длина разрядного промежутка равна удвоенной длине закраины, за исключением мест расположения выводов, где эта длина равна длине одной закраины. Поэтому обычно длины закраин в секциях с выступающей и скрытой фольгой выбираются одинаковыми. В ряде случаев для повышения разрядных напряжений применяется дополнительная изоляция выводов секций в местах, где они шунтируют закраину.

При выборе закраины необходимо также учитывать возможный сдвиг фольги в процессе намотки секции.

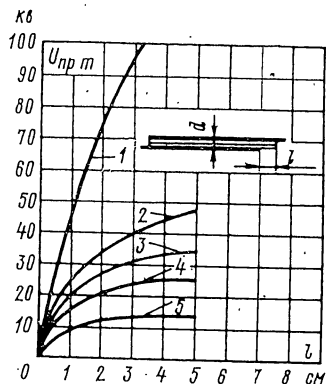


Рис. 17. Пробивное напряжение вдоль закраины в зависимости от ее длины

1 — при постоянном напряжении, 2, 3, 4, 5 — при переменном напряжении ($2 \rightarrow d = 9 \times 120$ мкм, $3 \rightarrow d = 10 \times 50$ мкм; $4 \rightarrow d = 5 \times 50$ мкм; $5 \rightarrow d = 8 \times 12$ мкм)

Поэтому в силовых импульсных конденсаторах обычно, независимо от номинального напряжения секции, длина закраины не выполняется менее 7 мм.

7. Частичные разряды в импульсных конденсаторах

Рядом исследований [12, 13, 14, 15] установлено, что основной причиной пробоя диэлектрика конденсатора, работающего в импульсном режиме, являются частичные разряды (ч. р.), развитие которых происходит следующим образом.

При приложении к слоистой изоляции переменного напряжения напряженность поля распределяется обратно пропорционально диэлектрическим проницае-

мостям. В бумажно-масляных конденсаторах масло, обладающее меньшей диэлектрической проницаемостью, подвергается воздействию большей напряженности поля. Поскольку жидкий диэлектрик обладает меньшей электрической прочностью по сравнению с бумагой или пленкой, то в нем при некоторой величине напряженности возникают ч. р. На краю электрода эти процессы имеют вид короны или скользящих разрядов, интенсивность которых увеличивается с ростом напряжения.

Эквивалентная схема замещения диэлектрика с учетом этих процессов представлена на рис. 18. Единичный ч. р., имеющий длительность 10^{-8} сек, сопровождается нейтрализацией определенного заряда q на емкости C_B , где C_B — емкость включения в толще диэлектрика, в объеме которого происходит ч. р. Интенсивность ч. р. оценивается по величине заряда при каждом ч. р. $q_{ч.р.}$ отнесенного к электродам исследуемого образца.

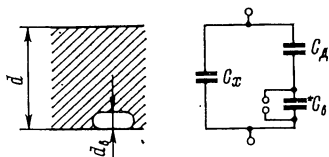


Рис. 18. Схема замещения при наличии частичного разряда в диэлектрике C_B — емкость включения; C_D — емкость диэлектрика, расположенного над включением; C_X — емкость образца

Обычно различают начальные и критические ч. р. Начальные ч. р. имеют интенсивность порядка 10^{-12} — 10^{-14} к, критические ч. р. имеют интенсивность порядка 10^{-10} к и более.

В подавляющем большинстве случаев допустимые рабочие напряженности должны быть ниже напряженности критических ч. р. (за исключением конденсаторов с крайне ограниченным сроком службы).

Регистрация ч. р. при импульсных воздействиях возможна следующими способами.

1. Непосредственная регистрация: по возникновению высокочастотных колебаний в схеме при настройке входного контура регистратора на частоты, существенно превышающие основную частоту импульса [16] или по возникновению свечения при ч. р. на краю фольги при помощи фотоэлектронного умножителя (на образцах специальной формы).

2. Косвенная регистрация: по снижению напряжения ч. р., измеренного на напряжения промышленной частоты; по появлению газовыделения или следов разрядов на фотопленке, положенной на край фольги, и др.

Характерные осциллограммы импульсов фототока, возникающих под действием ч. р., приведены на рис. 19.

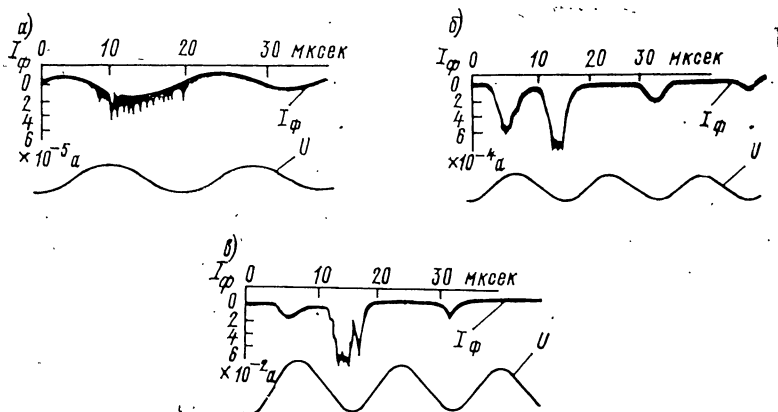


Рис. 19. Осциллограммы импульсов фототока, возникающих под действием частичных разрядов (колебательный импульс напряжения, $f=50$ кГц); а — $E=24$ кВ/мм; б — $E=50$ кВ/мм; в — $E=105$ кВ/мм

Для конденсаторной изоляции возникновение начальных и критических ч. р. определяется процессами, происходящими у края фольги. При этом зависимость средней напряженности частичных разрядов $E_{ч.р.} = U_{ч.р.}/d$ от толщины диэлектрика d по аналогии с напряженностью скользящих разрядов [см. формулы (21) и (22)] выражается соотношением

$$E_{ч.р.} = A/\sqrt{d}, \quad (24)$$

в котором постоянная A зависит от вида ч. р. Это хорошо подтверждается структурой соответствующих эмпирических формул, причем амплитудное значение напряженности начальных и критических ч. р., измеренное при напряжении промышленной частоты,

незначительно отличается от напряженности ч. р. при импульсном напряжении (слабозатухающий колебательный импульс).

Для бумажной изоляции, пропитанной нефтяным маслом, зависимость напряженности ч. р. от толщины диэлектрика может быть представлена следующими формулами: для начальных ч. р. на уровне 10^{-12} к:

$$E_n = 7,8d^{-0,58}, \quad (25)$$

для критических ч. р.

$$E_{кр} = 14d^{-0,58}, \quad (26)$$

где d — толщина изоляции, мм; E — средняя напряженность поля, кВ/мм (амплитудное значение).

Зависимости напряженности начальных и критических ч. р. от толщины диэлектрика приведены на рис. 20. Для бумажной изоляции, пропитанной трихлордифенилом или касторовым маслом, напряженности критических ч. р. мало отличаются от значений, вычисленных по формуле (26).

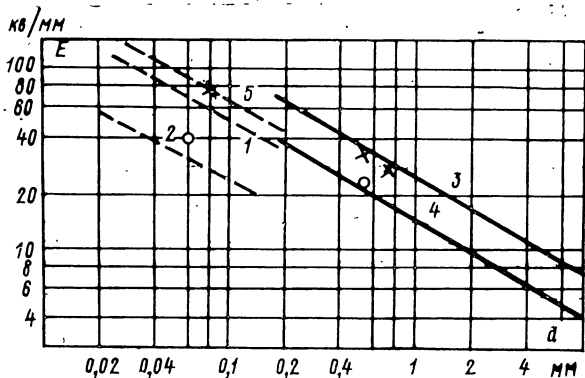


Рис. 20. Зависимость амплитудного значения напряженности ч. р. от толщины для изоляции из конденсаторной (1, 2), кабельной (3, 4) бумаги и для пленочно-бумажной изоляции (5).

Пропитка конденсаторным маслом

1, 3 и 5 — напряженность критических ч. р., 50 гц; 2 и 4 — напряженность начальных ч. р., 50 гц; x — критические ч. р. в импульсном режиме; o — начальные ч. р. в импульсном режиме

Для комбинированной пленочно-бумажной изоляции в случаях, когда диэлектрическая проницаемость пленки меньше диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги, при пропитке полярной жидкостью (трихлордифенилом) напряженности ч. р. повышаются. Так, например, для полипропиленово-бумажной изоляции (50% пленки, 50% бумаги) по сравнению с чисто бумажной напряженности ч. р. повышаются приблизительно на 20%.

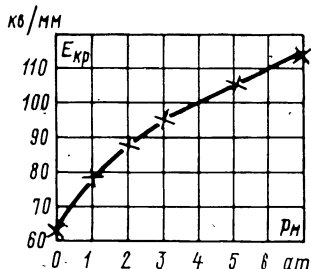


Рис. 21. Зависимость напряженности критических ч. р. от избыточного давления масла. Толщина изоляции 80 мкм, 50 гц.

Повышение избыточного давления пропитывающего состава приводит к значительному увеличению напряженности ч. р. Это объясняется тем, что с ростом давления увеличивается электрическая прочность жидкого диэлектрика.

На рис. 21 приведено относительное изменение напряженности критических ч. р. для бумажно-масляной изоляции от избыточного давления масла. Эта зависимость может быть представлена в виде:

$$E_{кр p} = E_{кр 0} (1 + 0,11 p_m), \quad (27)$$

где $E_{кр p}$ — напряженность критических ч. р. при избыточном давлении p_m ; $E_{кр 0}$ — напряженность критических ч. р. при атмосферном давлении.

Опыт показывает, что повышение избыточного давления сверх определенной величины нерационально, так как приводит к незначительному повышению электрической прочности изоляции, что ограничивает допускаемые напряженности, выбираемые при этом уже с точки зрения кратковременной прочности. При этом чем меньше толщина диэлектрика, тем ниже предельная величина рационального повышения давления. Так, для конденсаторной изоляции с толщиной диэлектрика 80—100 мкм повышение давления рационально до 6—8 ат.

Напряженность ч. р. может быть увеличена следующими путями.

1. Уменьшением толщины диэлектрика d между обкладками фольги секций конденсаторов [17, 18]: при этом, при неизменной средней напряженности, существенно снижается напряженность поля у края электрода (напряженность ч. р. растет приблизительно пропорционально $1/\sqrt{d}$ [см. формулы (25), (26)]). Предел уменьшения числа слоев между электродами определяется снижением кратковременной пробивной прочности изоляции при малом числе слоев. При этом толщина диэлектрика обычно принимается не ниже 60 мкм.

2. Повышением давления пропитывающего состава внутри бака конденсатора [19, 20]. Применение избыточного давления порядка 3—4 ат позволяет повысить рабочую напряженность на 30—50%. Однако это значительно усложняет конструкцию и утяжеляет бак конденсатора, особенно при больших габаритах.

3. Изменением распределения электрического поля в различных компонентах изоляции. С этой целью целесообразно применение пропитывающих составов с повышенной диэлектрической проницаемостью и применение комбинированной пленочно-бумажной изоляции. В практике конденсаторостроения наибольшее распространение получили первый и третий способы. Второй способ в настоящее время применяется только отдельными иностранными фирмами [20].

Как показано в [21], развитие ч. р. в отдельных областях изоляции (включениях) при импульсном напряжении принципиально не отличается от того, что имеет место при переменном синусоидальном напряжении [22]. Если обозначить: $U_{вм}$ — амплитуду напряжения, которая была бы достигнута на включении при отсутствии ч. р.; $U_{в.з}$ — напряжение зажигания разряда во включении; $U_{в.п}$ — напряжение погасания разряда, то, как следует из рис. 22, а, число ч. р. за один полупериод $T/2$ определится выражением

$$m_{\sim} = \frac{2U_{вм} - (U_{в.з} + U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}}. \quad (28)$$

Если амплитуда напряжения, приложенного к диэлектрику конденсатора, равна U_m , то, согласно рис. 18, $U_{вм} = U_m \eta$, где $\eta = \frac{C_d}{C_d + C_b}$.

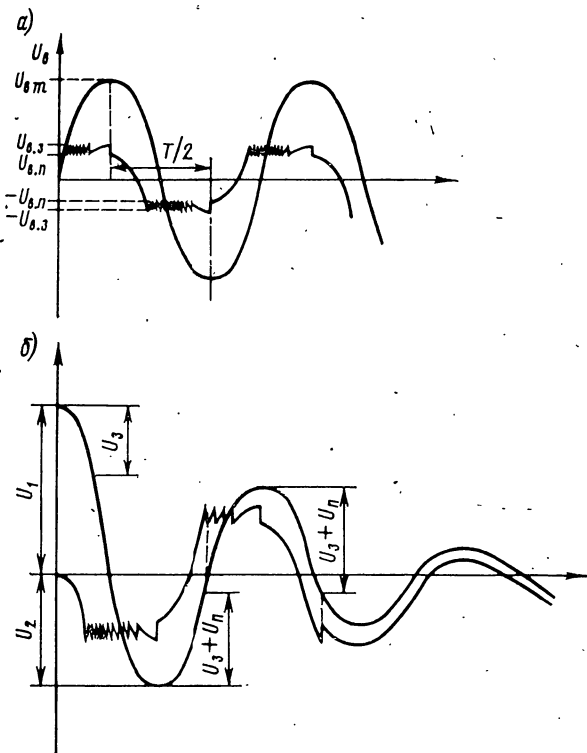


Рис. 22. Развитие частичных разрядов в изоляции: а — при синусоидальном напряжении; б — при импульсном напряжении

Кроме того, если U_3 — напряжение зажигания ч. р. и U_{Π} — напряжение погасания ч. р., то $U_3 = U_{в,з}/\eta$ и $U_{\Pi} = U_{в,п}/\eta$, и тогда выражение (28) принимает вид:

$$m_{\sim} = \frac{2U_m - (U_3 + U_{\Pi})}{U_3 - U_{\Pi}}. \quad (29)$$

При работе конденсаторов в генераторах больших импульсных токов изоляция конденсаторов, как правило, находится под воздействием затухающих коле-

бательных импульсов напряжения. Число ч. р. за один импульс может быть определено аналогичным образом. При этом число разрядов m_1 за первый полупериод приложенного напряжения (рис. 22, б) может быть определено из соотношения:

$$m_1 = \frac{U_m \eta + U_2 \eta - U_{в.з}}{U_{в.з} - U_{в.п}} = \frac{U_m + U_2 - U_3}{U_3 - U_{п}}, \quad (30)$$

а за k -й полупериод:

$$\begin{aligned} m_k &= \frac{U_k \eta + U_{k+1} \eta - (U_{в.з} + U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}} = \\ &= \frac{U_k + U_{k+1} - (U_3 + U_{п})}{U_3 - U_{п}}, \end{aligned} \quad (31)$$

где $U_m = U_1$ — величина зарядного напряжения; U_k — амплитуда k -го максимума, и

$$U_k = U_{k+1} \exp\left(-\frac{T}{2} \alpha_k\right),$$

где α_k — коэффициент затухания контура разряда конденсатора.

Частичные разряды будут иметь место до тех пор, пока амплитуда напряжения на включении не станет ниже напряжения зажигания ч. р. $U_{в.з}$. Число таких полупериодов n будет определяться из соотношения:

$$U_m \exp\left(-\frac{T}{2} \alpha_k n\right) = U_3 \text{ или } n = \frac{2}{T \alpha_k} \ln \frac{U_m}{U_3}. \quad (32)$$

Общее число разрядов за один импульс воздействующего напряжения m_n может быть определено как

$$m_n = \sum_{k=1}^n m_k. \quad (33)$$

Учитывая (28) — (31), получаем

$$\begin{aligned} m_n &= \frac{U_{п}}{U_3 - U_{п}} + \frac{1}{U_3 - U_{п}} \times \\ &\times \left\{ \frac{\left[1 + \exp\left(-\frac{T}{2} \alpha_k\right)\right] U_m \left(1 - \frac{U_3}{U_m}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{2} \alpha_k\right)} - n(U_3 + U_{п}) \right\}. \end{aligned} \quad (34)$$

Энергия, рассеиваемая при единичном ч. р.,

$$W_{\text{ч. р.}} = \frac{C_{\text{в.}}}{2} (U_{\text{в. з.}}^2 - U_{\text{в. п.}}^2). \quad (35)$$

Зная энергию ч. р. $W_{\text{ч. р.}}$, можно определить энергию, затраченную на ч. р. за один импульс приложенного напряжения

$$W_{\text{н}} = W_{\text{ч. р.}} m_{\text{н}}. \quad (36)$$

Число эквивалентных полупериодов $k_{\text{э.кв.}} = m_{\text{н}}/m_{\sim}$ при замене одного импульса синусоидальным напряжением с одинаковой амплитудой U_m на основании (29) и (34) будет

$$k_{\text{э.кв.}} = \frac{m_{\text{н}}}{m_{\sim}} = \frac{1 + e^{-\frac{T}{2} \alpha_{\text{к}}}}{2 \left(1 - e^{-\frac{T}{2} \alpha_{\text{к}}} \right)} - \frac{2n - 1}{2 \left(\frac{U_m}{U_{\text{з}}} - 1 \right)}. \quad (37)$$

При слабозатухающих колебаниях ($n \gg 1$), учитывая, что $U_{\text{з}} \approx U_{\text{п}}$, а также выражение для декремента колебаний

$$\Delta = e^{T \alpha_{\text{к}}}, \quad (38)$$

имеем

$$k_{\text{э.кв.}} = \frac{\sqrt{\Delta} + 1}{2(\sqrt{\Delta} - 1)} - \frac{n}{\Delta^{n/2} - 1}. \quad (39)$$

В большинстве случаев в изоляции имеются различные включения с различными значениями величин $U_{\text{в.з.}}$ и $U_{\text{в.п.}}$. При этом с ростом амплитуды напряжения увеличивается не только количество ч. р. в каждом включении, но и количество мест (включений), в которых возникают разряды. Учет статистического разброса в напряжении зажигания отдельных включений, в соответствии с [23], приводит к следующей зависимости числа ч. р. за один полупериод синусоидального напряжения от амплитуды этого напряжения:

$$m_{\sim} = AU_{\text{м}}^a, \quad (40)$$

где $a = 5 \div 7$.

Тогда за k -й полупериод число разрядов

$$m_k = AU_k^a, \quad (41)$$

где

$$U_k = U_m e^{-\frac{kT}{2} \alpha_K} \quad (42)$$

Общее число n полупериодов, вызывающих появление ч. р., определяется выражением (32).

Общее число ч. р. m_n за один колебательный импульс воздействующего напряжения будет

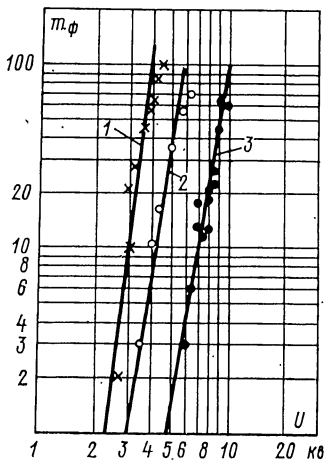
$$m_n = \sum_{k=1}^n m_k = AU_m^a \sum_{k=1}^n e^{-\frac{kT}{2} \alpha_K} = AU_m^a \frac{1 - \Delta^{-\frac{an}{2}}}{1 - \Delta^{-\frac{a}{2}}}. \quad (43)$$

При переходе от импульсных воздействий на эквивалентное воздействие синусоидального напряжения с амплитудой, равной амплитуде импульса, каждый импульс может быть заменен эквивалентным числом полупериодов $k_{\text{эКВ}}$. Согласно (40) и (43),

$$k_{\text{эКВ}} = \frac{m_n}{m_{\sim}} = \frac{1 - \Delta^{-\frac{an}{2}}}{1 - \Delta^{-\frac{a}{2}}}, \quad (44)$$

Рис. 23. Зависимость числа импульсов фототока m_{ϕ} за один импульс 10/1000 мксек от амплитуды импульсного напряжения для образцов бумажно-масляной изоляции. Интервал времени отсчета — 80 мксек, считая от начала импульса. Конденсаторная бумага КОН-П, 10 мкм

1 — $d_c = 80$ мкм; 2 — $d_c = 160$ мкм
3 — $d_c = 240$ мкм



При слабозатухающих колебаниях

$$k_{\text{экв}} = \frac{1}{1 - \Delta - \frac{a}{2}}. \quad (45)$$

Если колебательный импульс имеет сильное затухание ($\Delta > 1,5$), то $k_{\text{экв}} \approx 1$.

Экспериментальное исследование зависимости числа ч. р. за один импульс от амплитуды напряжения подтверждают зависимости (40) и (43).

На рис. 23 приведены зависимости числа ч. р. от напряжения для различных образцов изоляции, полученные при воздействии импульсного напряжения. Регистрация ч. р. производилась при помощи фотоэлектронного умножителя по импульсам свечения (фототока), возникающим при ч. р. Как следует из рис. 23, зависимость числа ч. р. (числа импульсов фототока) от напряжения или напряженности может быть представлена в виде:

$$m_n = AU^a \text{ или } m_n = A_1 E^a, \quad (46)$$

где a зависит от вида и толщины диэлектрика и лежит в пределах от 5 до 10, что хорошо соответствует формулам (40) и (43).

8. Старение изоляции импульсных конденсаторов и допустимые рабочие напряженности

Старение изоляции импульсных конденсаторов может происходить как за счет разрушения изоляции частичными разрядами (ч. р.), так и за счет электрохимических явлений, протекающих в диэлектрике главным образом при приложении постоянного (зарядного) напряжения.

Как указывалось выше, основное разрушение происходит под действием ч. р. и заключается в разрыве молекулярных связей и образовании радикалов. Возможен и обратный процесс, связанный с этими явлениями: сшивание молекул или присоединение радикалов. Эти явления связаны с выделением водорода или других газов водородного происхождения: метана, углекислого газа и т. д. Возможно образование кислот, агрессивно действующих на твердый диэлек-

трик, углеродистых соединений, имеющих значительную проводимость.

Для количественной оценки степени разрушения целесообразно воспользоваться энергетической характеристикой диэлектриков, связывающей энергию, переданную веществу, и степень разрушения. Энергетическая характеристика B имеет физический смысл количества вещества, разрушенного (образованного или выделенного) при воздействии разрядов с энергией 1 дж, и имеет размерность г/дж или см³/дж.

Изоляция обладает способностью в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему действию процессов, протекающих при этом напряжении. Эта способность может быть охарактеризована ресурсом изоляции R , определяемым количеством твердого, жидкого или газообразного вещества, которое должно быть разрушено (образовано или выделено) для того, чтобы привести к нарушению электрической прочности изоляционной конструкции.

Ресурс изоляции зависит от структуры и размеров изоляции, видов диэлектриков, входящих в эту структуру, а также от конструкции изоляции, расположения электродов и их формы. Для импульсных конденсаторов, в которых основное разрушение диэлектрика происходит на краю обкладок, целесообразно ресурс изоляции относить к единице длины края обкладок.

Для заданной изоляционной конструкции при изменении напряжения в определенных пределах в первом приближении этот ресурс может быть принят постоянным. В этом случае срок службы изоляции

$$\tau = \frac{R}{BP_{ч.р}}, \quad (47)$$

где $P_{ч.р}$ — мощность частичных разрядов; зависящая от приложенного напряжения; B — коэффициент, определяющий количество разрушенного диэлектрика (расходование ресурса) за счет ч. р. с энергией 1 дж.

Для импульсных конденсаторов предельное количество разрядов z за весь срок службы при заданном напряжении

$$z = \frac{R}{BW_{н}}, \quad (48)$$

где $W_{\text{и}}$ — энергия, затраченная на ч. р. за один импульс при заданном напряжении.

Работа изоляции импульсных конденсаторов при напряженности, превышающей напряженность начальных ч. р., связана с разложением пропитывающего состава вследствие ионизационных процессов. При этом в конденсаторах с пропиткой нефтяным маслом ч. р., воздействуя на пропитывающий состав, приводят к выделению газов, преимущественно водорода.

Значительное газовыделение может привести к местному снижению электрической прочности и развитию сквозного пробоя или перекрытия по закраине изоляции секции, а также пробоем главной изоляции конденсатора или масляной части высоковольтного ввода. Поэтому рабочую напряженность и режим работы конденсатора целесообразно выбирать так, чтобы общий объем выделившегося газа не превышал количества газа, способного раствориться в объеме жидкого диэлектрика, содержащегося в конденсаторе. Объем $V_{\text{г}}$ выделившегося за каждый импульс в результате разложения пропитывающего состава ч. р. пропорционален энергии $W_{\text{и}}$:

$$V_{\text{г}} = W_{\text{и}} B_{\text{г}}, \quad (49)$$

где $B_{\text{г}}$ — коэффициент газовыделения, показывающий, сколько см^3 газа выделилось в жидком диэлектрике под воздействием ч. р. с энергией в 1 дж.

Коэффициент газовыделения зависит от химического состава жидкости и от температуры. Так, например, для нефтяного масла величина $B_{\text{г}}$ изменяется от $3 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{дж}$, причем меньшие значения относятся к маслам, имеющим большее процентное содержание ароматических углеводородов. Наличие ароматических (непредельных) углеводородов приводит к тому, что определенное количество водорода, возникающее в результате ч. р., может химически связываться вследствие разрыва двойных связей, что приводит к существенному уменьшению коэффициента газовыделения.

Зависимость $B_{\text{г}}$ от температуры t хорошо аппроксимируется формулой

$$B_{\text{г}} = B_{\text{г}0} (t/t_0)^n, \quad (50)$$

где $B_{г0}$ — коэффициент газовыделения в $\text{см}^3/\text{дж}$ при температуре t_0 и $n=0,8$. При $t_0=20^\circ\text{C}$ для товарного конденсаторного масла $B_{г0}=4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{дж}$.

Как показано [21], выбор рабочих напряженностей в импульсных конденсаторах с изоляцией, пропитанной нефтяным маслом, может быть произведен исходя из допустимого газовыделения. При этом надежная работа изоляции конденсаторов может быть получена, если интенсивность газовыделения не будет превышать газопоглощающей способности жидкого диэлектрика.

Газопоглощающая способность жидкости зависит от степени насыщения жидкости газом

$$v_t = \delta_r (V_0 - V_t), \quad (51)$$

где v_t — количество газов, поглощаемых данным объемом жидкости в единицу времени; V_0 — максимальное количество газов, которое может быть поглощено данным объемом жидкости; V_t — количество газов, поглощенных данным объемом жидкости в момент времени t ; δ_r — коэффициент, характеризующий скорость газопоглощения и определяемый коэффициентом диффузии газа в жидкость.

Если число импульсов напряжения (число разрядов конденсаторов) в секунду равно z_1 (причем z_1 может быть меньше единицы), то условие равновесия между газовыделением в результате ч. р. и газопоглощающей способностью жидкого диэлектрика будет выражаться так:

$$W_{\text{н}} B_{г} z_1 = v_t. \quad (52)$$

Условие (49) позволяет определить предельное количество разрядов z конденсатора за весь срок службы при заданной напряженности или допустимую напряженность при заданном сроке службы конденсаторов.

Общий объем выделившегося газа не должен превосходить максимального количества газов, которое может быть поглощено данным объемом жидкого диэлектрика. Этот объем

$$V_0 = \int_0^{\infty} v_t dt, \quad (53)$$

и тогда

$$W_{\text{н}} = \frac{V_0}{zB_r} \quad (54)$$

При определении допустимой напряженности при заданном сроке службы (числе разрядов) по соотношению (54) можно определить $W_{\text{н}}$, а затем, пользуясь равенствами (36) и (34) или (43), определить допустимую амплитуду напряжения U_m и, соответственно, допустимую напряженность электрического поля в конденсаторах.

На рис. 24 показана зависимость интенсивности газовыделения от напряженности электрического поля в образцах конденсаторной изоляции, пропитанной конденсаторным маслом.

Из рис. 24 видно, что интенсивность газовыделения резко возрастает после достижения некоторой критической напряженности $E_{\text{кр}}$, связанной, по-видимому, с переходом

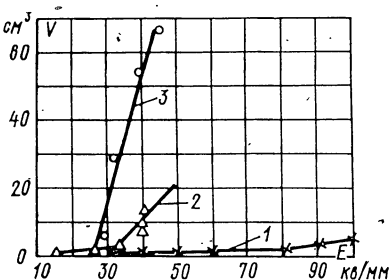


Рис. 24. Зависимость объема V выделившегося газа от напряженности E электрического поля при работе в импульсном режиме для конденсаторной изоляции; пропитка конденсаторным маслом; емкость образцов 10000 пф, число импульсов 1000; частота колебаний 0,25 МГц; декремент колебаний $\Delta = 1,1$.

1 — бумага КОИ-И, толщина изоляции 0,08 мм, 2 — бумага К-080, толщина изоляции 0,48 мм; 3 — бумага К-080, толщина изоляции 0,64 мм

процессов на краю электродов от короны (начальные ч. р.) к интенсивным скользящим разрядам (критические ч. р.).

Так, например, для изоляции толщиной 80 мкм $E_{\text{кр}}$ получено равным 80 кВ/мм. Интересно отметить, что эти напряженности практически совпадают с напряженностями появления критических ч. р. при напряжении промышленной частоты (см. рис. 20). Распространяя это положение на другие толщины изоляции, можно по данным для критических ч. р., полученным при напряжении промышленной частоты, определить напряженность интенсивного газовыделения в кон-

денсаторной изоляции, работающей в импульсном режиме. Полученные значения напряженностей, соответствующие резкому увеличению интенсивности ч. р., являются предельными для работы изоляции конденсаторов в импульсном режиме.

Расчет допустимых рабочих напряженностей при ограниченном сроке службы конденсаторов (не менее 10 000 разрядов) приводит обычно к значениям, лежащим между E_n и $E_{кр}$. Так, например, для секции с изоляцией из конденсаторной бумаги толщиной 100 мкм с пропиткой конденсаторным маслом величина рабочей напряженности может быть принята равной 60—65 кВ/мм. При значительном сокращении срока службы эта величина может быть увеличена до 80 кВ/мм.

Если срок службы конденсатора исчисляется многими миллионами импульсов на рабочем напряжении, то допустимы ч. р. лишь весьма малой интенсивности. Рабочая напряженность в этом режиме с точки зрения ч. р. может быть определена по отсутствию изменения характеристик ч. р. на переменном напряжении после большого числа импульсов (порядка многих тысяч).

На рис. 25 приведены зависимости напряжения критических ч. р. $U_{кр}$ от напряженности электрического поля при испытании конденсаторов в импульсном режиме при воздействии ~ 5000 разрядов. Кривая 1 получена для изоляции толщиной 80 мкм из конденсаторной бумаги КОН-II, пропитанной нефтяным маслом. Как следует из графика, снижение характеристик ч. р. происходит при напряженности, превышающей 40 кВ/мм, а для изоляции толщиной 0,48 мм из кабельной бумаги К-08 — при 25 кВ/мм.

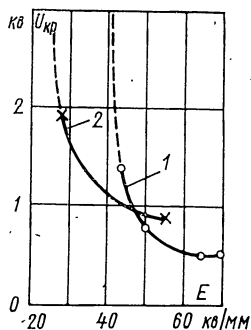


Рис. 25. Зависимость напряжения критических ч. р., измеренного при 50 Гц, от напряженности при испытании конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией в режиме колебательных разрядов. Декремент колебаний $\Delta = 1,25$

1 — бумага КОН-II, толщина изоляции 0,08 мм; 2 — бумага К-080, толщина изоляции 0,48 мм

На основании этих данных можно считать, что рабочие напряженности конденсаторов, предназначенных для весьма длительной работы в импульсном режиме порядка 10^6 — 10^7 импульсов должны быть ниже значений, приводящих к изменению характеристик ч. р. в импульсном режиме. Так, например, для секций из конденсаторной бумаги толщиной 80 мкм, пропитанной конденсаторным маслом, рабочая напряженность для этого режима работы с точки зрения характеристик ч. р. не должна превосходить 40 кв/мм.

В большинстве случаев при разработке конденсаторов для генераторов импульсных токов с малой повторяемостью импульсов целесообразно допустить значительно большую интенсивность ч. р. При этом появляется возможность существенного уменьшения габаритов и увеличения удельной энергии конденсаторов.

Практически всегда, кроме конденсаторов с весьма ограниченным сроком службы (сотни импульсов), рабочая напряженность должна быть ниже напряженности критических ч. р.

В бумажных конденсаторах, пропитанных хлордифенилами, разрушение пропитывающего состава под воздействием ч. р. происходит, главным образом, путем отрыва атомов водорода и хлора от молекул хлордифенилов. Вследствие большого количества непредельных углеводородов в составе хлордифенилов слабое газовыделение происходит только под воздействием ч. р. повышенной интенсивности. Возникающие при этом атомы водорода и хлора большей частью либо присоединяются молекулами в результате разрыва двойных связей, либо вследствие высокого сродства хлора к водороду образуется хлористый водород. Кроме того, под воздействием ч. р. из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи [24, 25]. Выделение углерода в виде сажи отмечено также и для бумажной изоляции, пропитанной касторовым маслом.

При выборе допустимой рабочей напряженности в бумажной изоляции, пропитанной хлорированными жидкими диэлектриками или касторовым маслом, необходимо учитывать их большую стойкость к воздействию ч. р.

Кроме того, вследствие большей диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика уменьшается доля напряжения в импульсном режиме, приходящаяся на прослойку жидкого диэлектрика, что затрудняет образование ч. р. в этой прослойке.

Это приводит к возможности существенного повышения рабочих напряженностей. Так, например, для изоляции из конденсаторной бумаги КОН-II, пропитанной касторовым маслом или хлорированными

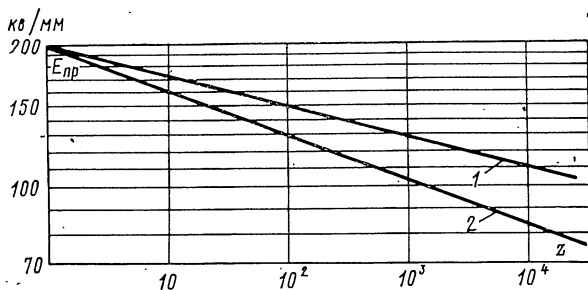


Рис. 26. Зависимость пробивной напряженности от числа разрядов для образцов бумажной изоляции толщина 0,08 мм, $f = 150$ кГц, $\Delta = 1,33$

1 — пропитка касторовым маслом; 2 — пропитка конденсаторным маслом

жидкими диэлектриками, для срока службы не менее 10 000 разрядов рабочая напряженность может быть повышена до 80 кВ/мм. При сроке службы не менее 1000 разрядов допустимая рабочая напряженность для этой изоляции может быть увеличена до 100—120 кВ/мм.

Эксперименты достаточно хорошо подтверждают значения допустимых рабочих напряженностей, полученных на основании характеристик ч. р.

На рис. 26 приведены зависимости пробивной напряженности $E_{пр}$ от числа разрядов z для изоляции из конденсаторной бумаги КОН-II, пропитанной конденсаторным и касторовым маслом. Из этих зависимостей следует, что пробивная напряженность при сроке службы 10^4 импульсов для толщины изоляции 80 мкм при пропитке конденсаторным маслом состав-

ляет 85 кв/мм, а при пропитке касторовым маслом — 110 кв/мм.

Из приведенных данных следует, что для бумажной изоляции, пропитанной касторовым маслом, рабочую напряженность можно принять приблизительно в 1,4—1,5 раза больше, чем для изоляции, пропитанной конденсаторным маслом. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость первой изоляции в 1,4 раза больше, чем для второй, удельная энергия конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, может быть увеличена приблизительно в 3 раза.

Допустимая рабочая напряженность зависит от толщины изоляции секций d . В связи с тем, что напряженности ч. р. растут с уменьшением толщины диэлектрика приблизительно обратно пропорционально $\sqrt{d}$, то в первом приближении допустимая рабочая напряженность будет увеличиваться пропорционально увеличению $E_{ч.р.}$, т. е. в соответствии с формулами (25) и (26).

При применении бумажной изоляции в конденсаторах с последовательным соединением секций (без плавких предохранителей, отключающих пробитую секцию) уменьшение толщины диэлектрика ограничивается падением кратковременной электрической прочности изоляции за счет наличия проводящих включений в конденсаторной бумаге (см. рис. 12, кривая 1). Использование для этой цели очень тонких бумаг неэкономично из-за высокой их стоимости. Кроме того, выигрыш в электрической прочности при малых d при применении бумаг с меньшими толщинами листа обычно не очень велик вследствие того, что в более тонких бумагах растет количество проводящих включений, приходящихся на 1 м². Вследствие этого обычно толщина изоляции секций не принимается меньше 50—60 мм.

Для бумажно-пленочного диэлектрика качественно имеет место аналогичная зависимость $E_{ч.р.}$ от толщины, как и для бумажного диэлектрика, но абсолютная величина $E_{ч.р.}$ имеет повышенное значение (см. рис. 20, кривая 5) и зависит как от содержания пленочного диэлектрика, так и от диэлектрической проницаемости компонентов бумажно-пленочного и пропитывающего диэлектриков.

Применение диэлектрика меньшей толщины позволяет в бумажно-пленочной изоляции существенно увеличить среднюю напряженность электрического поля в импульсных конденсаторах до 150—200 кВ/мм. Это позволяет в ряде случаев, несмотря на меньшее значение диэлектрической проницаемости бумажно-пленочного диэлектрика, например, на основе полиэтилентерефталатной пленки, по сравнению с бумажной изоляцией, пропитанной хлордифенилами или касторовым маслом, создавать конденсаторы с более высокой удельной энергией.

При работе пленочной и бумажно-пленочной изоляции в режиме многократных импульсов под воздействием ч. р., так же как и в бумажной изоляции, наиболее сильно разрушается пропитывающий состав. Поэтому допустимые рабочие напряженности в основном определяются допустимыми напряженностями в жидком диэлектрике.

Напряженность электрического поля E_i в i -й компоненте с диэлектрической проницаемостью ε_i в n -компонентной слоистой изоляции

$$E_i = \frac{E}{\varepsilon_i \sum_{m=1}^n \frac{a_m}{\varepsilon_m}}, \quad (55)$$

где E — средняя напряженность электрического поля в изоляции; a_m — объемная доля m -й компоненты с диэлектрической проницаемостью ε_m .

Главный резерв повышения срока службы и допустимых напряженностей в комбинированной изоляции заключается в разгрузке пропитывающего вещества и соответствующей дополнительной нагрузке пленки. Это возможно при повышении ε пропитывающего вещества, например, путем применения хлордифенилов или касторового масла.

Учитывая зависимость пробивной напряженности от толщины диэлектрика, в соответствии с рис. 12, преимущества комбинированной изоляции будут проявляться тем сильнее, чем меньше толщина изоляции, так как для этой изоляции слабее сказывается вредное влияние мест с пониженной электрической прочностью.

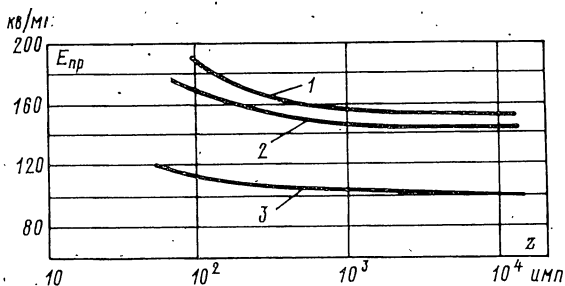


Рис. 27. Зависимость пробивной напряженности от числа импульсов для образцов комбинированной изоляции на основе полиэтилентерефталатной пленки 8 мкм, пропитанной касторовым маслом (50% пленки). Режим колебательного разряда с частотой следования 2 имп/сек, декремент колебаний $\Delta=1,35$, частота колебаний 150 кГц

1 — $d_c=28$ мкм; 2 — $d_c=46$ мкм; 3 — $d_c=82$ мкм

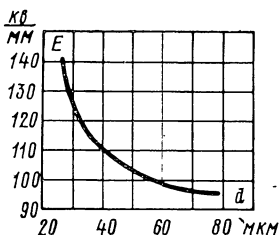


Рис. 28. Зависимость пробивной напряженности бумажно-плёночной изоляции на основе полиэтилентерефталатной пленки, соответствующей сроку службы 10^4 импульсов, от толщины диэлектрика для колебательного разряда с частотой следования 2 имп/сек, декремент колебаний $\Delta=1,35$, $f=150$ кГц

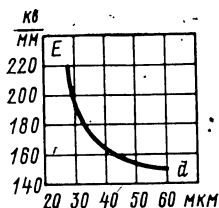


Рис. 29. То же, что на рис. 28 для аперидического разряда

На рис. 27 приведены зависимости пробивной напряженности от числа импульсов для комбинированной изоляции, состоящей из полиэтилентерефталатной (лавсановой) пленки, конденсаторной бумаги КОН-II с пропиткой касторовым маслом, при различных толщинах комбинированного диэлектрика d . На рис. 28 приведены зависимости пробивной напряженности бумажно-лавсановой изоляции от толщины диэлектрика, соответствующие сроку службы 10^4 импульсов для колебательного режима, а на рис. 29 — для аperiodического режима разряда. Из кривых рис. 27—29 следует, что длительная электрическая прочность существенно возрастает с уменьшением толщины диэлектрика.

Так, например, для бумажно-лавсановой изоляции при толщине диэлектрика $d=30—40$ мкм допустимые рабочие напряженности для колебательного режима разряда с декрементом колебаний $\Delta=1,35$ могут быть увеличены до 120—130 кВ/мм для аperiodического режима разряда — до 180—200 кВ/мм.

На интенсивность ч. р. в диэлектрике конденсатора сильное влияние оказывает не только напряженность электрического поля, но и форма воздействующего напряжения, причем, как следует из (34) или (43), наиболее сильно сказывается декремент колебаний контура. При увеличении декремента колебаний происходит уменьшение числа ч. р. за каждый импульс напряжения. Это приводит к уменьшению разрушения диэлектрика при воздействии импульсного напряжения. Влияние декремента колебаний на интенсивность газовыделения в бумажно-масляной изоляции иллюстрируется рис. 30. Как следует из этого рисунка, увеличение декремента колебаний с 1,25 до 3 приводит к уменьшению газовыделения в 5—6 раз. При этом допустимая рабочая напряженность конденсаторов может быть увеличена на 20—30%.

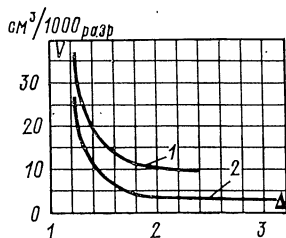


Рис. 30. Зависимость интенсивности газовыделения от декремента колебаний при $E=39,2$ кВ/мм
1 — толщина изоляции $d_c=0,64$ мм; 2 — толщина изоляции $d_c=0,48$ мм

Обозначим напряжение, равное сумме амплитуд зарядного напряжения U_m и напряжения первого полупериода обратного знака $U_{1\text{обр}}$, через U_{m-m} , а соответствующую ему напряженность — через E_{m-m} . При этом

$$U_{m-m} = U_m + U_{1\text{обр}}. \quad (56)$$

Величина U_{m-m} соответствует наибольшему перепаду напряжения в разрядном режиме. Увеличение декремента колебаний с 1,25 до 3 приводит к уменьшению величины U_{m-m} или E_{m-m} на 20%.

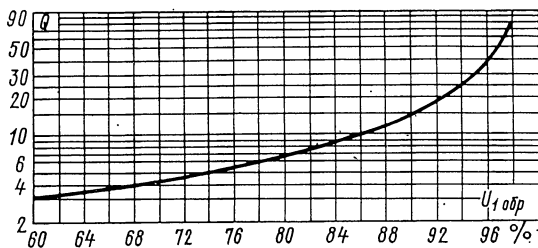


Рис. 31. Зависимость амплитуды первого полупериода напряжения обратного знака $U_{1\text{обр}}$ (в % от амплитуды зарядного напряжения) от добротности Q контура разряда конденсатора

Расчеты допустимой рабочей напряженности по допустимой интенсивности ч. р. показывают, что ожидаемый срок службы конденсатора есть функция напряженности E_{m-m} , соответствующей наибольшему перепаду напряжения в разрядном режиме. Таким образом, увеличение декремента колебаний, приводящее к уменьшению величины E_{m-m} в определенное число раз, приводит также к возможному увеличению рабочего напряжения (напряженности) во столько же раз.

Величина $U_{1\text{обр}}$ или $E_{1\text{обр}}$ в процентах от U_m или E_m целиком определяется добротностью контура разряда Q . Зависимость $U_{1\text{обр}}$ от Q приведена на рис. 31.

Как следует из выражения (54), срок службы (число разрядов) обратно пропорционально энергии $W_{\text{н}}$, затраченной на ч. р. за один импульс приложенного напряжения.

В соответствии с (36) и (46), зависимость $W_{\text{н}}$ от величины E_{m-m} при колебательном разряде конденсатора может быть представлена в виде:

$$W_{\text{н}} = A_2 E_{m-m}^a, \quad (57)$$

где a зависит от вида и толщины диэлектрика и лежит в пределах от 5 до 10. Из формул (54) и (57) следует, что зависимость срока службы конденсаторов от напряжения имеет вид:

$$z = A_3 E_{m-m}^{-a}. \quad (58)$$

При постоянстве $U_m/U_{1\text{обр}}$ срок службы конденсатора определяется величиной зарядного напряжения, т. е.

$$z = A_4 E_m^{-a}. \quad (59)$$

Формулами (58) или (59) при заданном значении a можно пользоваться только при напряжениях ниже напряжения критических ч. р., так как при возникновении критических ч. р. величина $W_{\text{н}}$ резко возрастает, а срок службы изоляции сокращается значительно скорее с ростом напряжения, что проявляется в увеличении степенного коэффициента a в этих формулах.

На рис. 26 приведена экспериментально полученная зависимость срока службы конденсаторов от напряженности, хорошо соответствующая формуле (59). На рис. 32 [27] аналогичная кривая построена в относительных единицах, причем 100%-ный срок службы соответствует номинальному напряжению (номинальной напряженности) конденсатора. В области напряженностей ниже номинальной кривая приблизительно удовлетворяет формуле (59).

На рис. 33 дана экспериментальная зависимость срока службы конденсаторов от амплитуды напряжения первого полупериода обратного знака (в процентах от зарядного напряжения) [27], а на рис. 34 — в зависимости от напряженности E_{m-m} , соответствующей наибольшему перепаду напряжения [28].

Как следует из приведенных данных, при работе конденсаторов следует по возможности увеличивать декремент колебаний, применяя для этой цели нели-

нейные сопротивления или кроубары, шунтирующие индуктивную нагрузку контура непосредственно после прохождения тока через максимум. Эти мероприятия

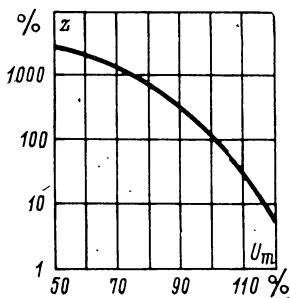


Рис. 32. Зависимость срока службы (числа разрядов) z конденсатора от зарядного напряжения $U_{100\text{p}}$ ($z=100\%$ при $U_{100\text{p}}/U_m=80\%$)

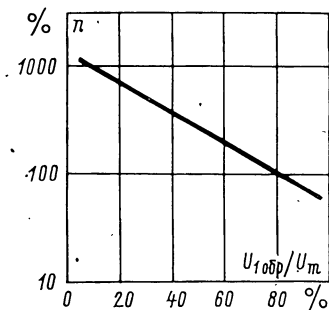


Рис. 33. Зависимость срока службы (числа разрядов) z конденсатора от величины $U_{100\text{p}}$ ($z=100\%$ при $U_{100\text{p}}/U_m=80\%$)

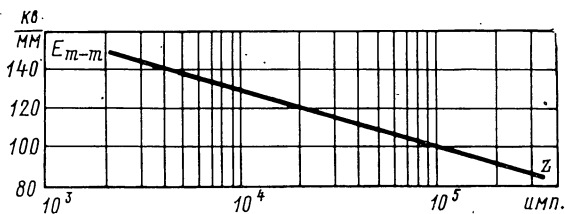


Рис. 34. Зависимость срока службы (числа разрядов) z конденсаторов от напряженности, соответствующей наибольшему перепаду напряжения $E_{m-m}=E_m+E_{100\text{p}}$ в разрядном режиме.

Конденсаторная бумага, пропитанная трихлордифенилом

позволяют существенно повысить рабочее напряжение батареи и увеличить амплитуду генерируемого разрядного тока.

Допустимая рабочая напряженность и срок службы зависят от частоты разряда конденсатора при неизменном декременте колебаний. Снижение срока

службы при возрастании частоты колебаний при разряде может быть объяснено тем, что время между положительным и отрицательным максимумами

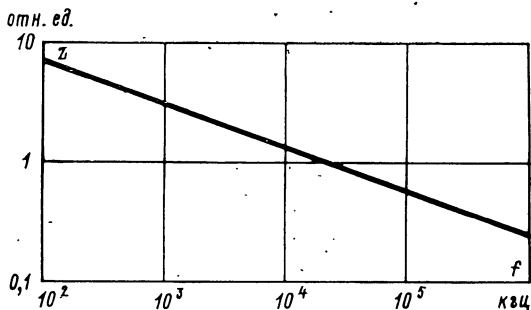


Рис. 35. Зависимость срока службы от частоты колебаний в разрядном режиме [67]

Таблица 6

Допустимые рабочие напряженности, применяемые в импульсных конденсаторах (значения приведены для толщины диэлектрика 80 мкм) при различном числе импульсов z

Вид диэлектрика	E_p (кв/мм) при различных сроках службы					
	Колебательный разряд $U_1 \text{ обр}/U_m = 0,8$			Апериодический разряд		
	$z \leq 10^3$	$z = 10^4$	$z = 10^6$	$z \leq 10^3$	$z = 10^4$	$z = 10^6$
Конденсаторная бумага, пропитанная нефтяным маслом	60—70	50—60	40—45	70—80	60—70	50—55
Конденсаторная бумага, пропитанная хлордифенилами или касторовым маслом	90—100	75—80	65—70	100—120	90—100	70—80
Пленочно-бумажная изоляция на основе лавсановой пленки, пропитанная хлордифенилами или касторовым маслом	150—200	100—120	80—100	200—220	160—200	100—120

напряжения становится недостаточным для рекомбинации ионов, возникающих под действием ч. р. Фирмы приводят несколько различные зависимости срока службы от частоты колебаний. На рис. 35 приведена эта зависимость по данным [67]. В [29] указывается, что срок службы практически не зависит от частоты колебаний при увеличении частоты до 10^5 гц, а при более высоких частотах начинает заметно снижаться с ростом частоты колебаний при разряде (рис. 36).

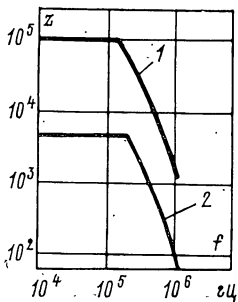


Рис. 36. Зависимость срока службы от частоты колебаний в разрядном режиме [29]

1 — пропитка касторовым маслом, 2 — пропитка трихлордифенилом

Наиболее часто применяемые величины допустимых рабочих напряженностей для конденсаторов различных типов приведены в табл. 6.

9. Сопротивление изоляции конденсатора

В процессе зарядки ток в конденсаторе падает до некоторой величины, которая определяется сопротивлением изоляции конденсатора. Так как обычно спадание тока со временем после зарядки геометрической емкости определяется процессами абсорбции

и происходит весьма медленно, то сопротивление изоляции конденсатора обычно измеряется после одномоментной выдержки при номинальном напряжении.

Сопротивление изоляции конденсатора определяет ток утечки на рабочем напряжении. Величина этого тока утечки во многом задает характеристики выпрямительного устройства, используемого для заряда конденсаторов в установке.

Сопротивление изоляции конденсатора зависит от вида диэлектрика, его номинальных параметров (емкости, напряжения, рабочей напряженности), а также от качества технологии изготовления (качества вакуумной сушки и пропитки, подготовки и очистки пропитывающего состава и т. п.).

При равноценных условиях изготовления для заданного вида диэлектрика и при одинаковых рабочих напряженностях сопротивление изоляции изменяется обратно пропорционально емкости

конденсатора C_K , а произведение сопротивления изоляции $R_{из}$ на емкость C_K является постоянной величиной, определяющей постоянную времени саморазряда конденсатора τ_K .

Действительно, для плоского конденсатора с толщиной диэлектрика d и площадью обкладок S

$$R_{из} = \rho_v \frac{d}{S}, \quad C_K = \varepsilon \frac{S}{d}$$

и

$$\tau_K = R_{из} C_K = \rho_v \varepsilon, \quad (60)$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление изоляции; ε — диэлектрическая проницаемость изоляции. Поэтому удобнее всего

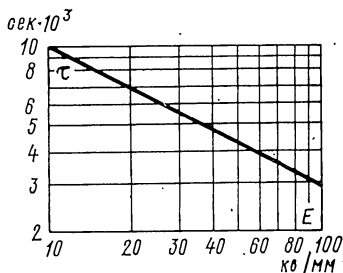


Рис. 37. Зависимость постоянной времени саморазряда конденсатора от напряженности электрического поля. Бумажная изоляция, пропитанная трихлордифенилом

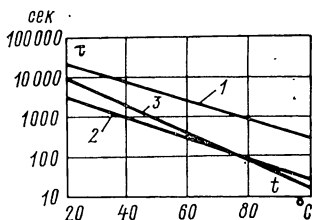


Рис. 38. Зависимость постоянной времени саморазряда конденсатора от температуры

1 — бумажно-полиэтилентерефталатная изоляция, пропитка конденсаторным маслом; 2 — бумажная изоляция, пропитка трихлордифенилом; 3 — бумажная изоляция, пропитка пентахлордифенилом

сопротивление изоляции оценивать в единицах, приведенных к единице емкости конденсатора: $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ ($\text{ом} \cdot \text{ф}$ или сек).

Сопротивление изоляции конденсатора зависит от напряженности электрического поля, причем с ростом напряженности величина τ_K падает (рис. 37).

Значения постоянных времени саморазряда для различных конденсаторов приведены в табл. 7 [1].

Сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$ сильно падает с ростом температуры t , причем зависимость $R_{из}$ от t может быть представлена формулой

$$R_{из} t = R_{из 0} e^{-a(t-t_0)}, \quad (61)$$

где $R_{из t}$ — сопротивление изоляции при температуре t ; $R_{из 0}$ — сопротивление изоляции при температуре t_0 ; a — температурный коэффициент сопротивления изоляции. Для конденсаторов

Постоянные времени саморазряда для различных конденсаторов

Тип конденсатора	Норма на величину постоянной времени, $t = 20^\circ \text{C}$, $U = 500 \text{ в}$ Мом·мкф (сек)	Верхний предел постоянной времени при тщательном изготовлении, Мом·мкф (сек)
Полистирольный	5000	1 000 000
Фторопластовый	5000	1 000 000
Полиэтилентерефталатный	4000	100 000
Бумажно-плёночный	3000	100 000
Бумажный герметизированный	2000	10 000—20 000
Металлобумажный многослойный	1000	5 000—10 000

с органическим диэлектриком обычно α имеет величину 0,03—0,04, что соответствует уменьшению сопротивления изоляции приблизительно в два раза при увеличении температуры на 10°C .

Зависимости постоянной времени саморазряда конденсатора от температуры приведены на рис. 38.

Глава 3

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ
ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

10. Исходные данные для расчета конденсаторов

При расчете конденсатора исходными параметрами являются: номинальное рабочее напряжение U_p , номинальная емкость конденсатора C_k , режим работы, требуемый срок службы (количество импульсов). Кроме того, целесообразно задать надежность работы конденсатора или процент конденсаторов, которые могут иметь срок службы менее заданного, а также температурный режим (возможные изменения температуры окружающей среды).

Обычно при расчете заранее известен тип диэлектрика, на выборе которого могут сказаться требования по температурному режиму работы конденсатора и желательная удельная энергия конденсатора.

Режим работы и требуемый срок службы определяют допустимую рабочую напряженность (табл. 6) электрического поля в конденсаторе E_p , которая выбирается по характеристикам частичных разрядов (ч. р.).

11. Удельная энергия конденсатора

Удельная энергия активного объема конденсатора

$$W_{уд} = \frac{\epsilon E_p^2}{2}, \quad (62)$$

и определяется в основном рабочей напряженностью электрического поля E_p , принятой в конденсаторе.

Удельная энергия всего объема конденсатора

$$W_{уд.к} = \frac{C_k U_p^2}{2V_k}, \quad (63)$$

где V_k — объем конденсатора емкостью C_k и с рабочим напряжением U_p . $W_{уд.к}$ обычно меньше $W_{уд}$ и в лучших конструкциях конденсаторов, пригодных для использования в генераторах импульсных токов, составляет 50—70% $W_{уд}$.

В импульсных конденсаторах с изоляцией из конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом ($\epsilon/\epsilon_0 = 3,8—4,0$), величины удельной энергии определяются допустимыми рабочими напряженностями (табл. 6) и обычно лежат в пределах: для конденсаторов с последовательным соединением секций (U_p выше 15 кВ) $W_{уд.к} = 15 \div 35 \text{ дж/дм}^3$ и для конденсаторов с параллельным соединением секций и с уменьшенной толщиной диэлектрика d до 50 мкм ($U_p = 3 \div 6 \text{ кВ}$) $W_{уд.к} = 30 \div 50 \text{ дж/дм}^3$.

В конденсаторах с бумажной изоляцией, пропитанной хлордифенилами или касторовым маслом, вследствие больших допустимых рабочих напряженностей (табл. 6) и большей диэлектрической проницаемости изоляции ($\epsilon/\epsilon_0 = 5,5—6,0$), удельная энергия конденсаторов значительно выше и лежит в пределах: $W_{уд.к} = 70 \div 100 \text{ дж/дм}^3$ — для конденсаторов с $U_p > 20 \text{ кВ}$ и $W_{уд.к} = 100 \div 150 \text{ дж/дм}^3$ — для конденсаторов с $U_p < 10 \text{ кВ}$.

Наиболее высокая удельная энергия получена в бумажно-плёночных и плёночных конденсаторах за счет существенного увеличения допустимой рабочей напряженности (до 220 кВ/мм). При этом удельная энергия конденсаторов может быть повышена до 100—150 Дж/дм³ для конденсаторов, работающих в режиме колебательного разряда, и до 200—500 Дж/дм³ для конденсаторов, работающих в режиме аperiodического режима разряда.

12. Выбор геометрических размеров конденсатора

При заданной емкости C_k и номинальном напряжении U_p энергия конденсатора

$$W_k = \frac{C_k U_p^2}{2} \quad (64)$$

Размеры этого конденсатора можно оценить, зная его удельную энергию $W_{уд}$ по (62), на основании величины активного объема диэлектрика

$$V_{ак} = \frac{W_k}{W_{уд}} = \frac{C_k U_p^2}{\epsilon E_p^2} \quad (65)$$

Обычно полный объем конденсатора в 1,5—2 раза превышает активный объем диэлектрика за счет объема, занятого фольгой, краями секций, изляцией от корпуса, самим корпусом и т. д. Таким образом, объем конденсатора $V_k = (1,5 \div 2) V_{ак}$.

Зная объем конденсатора, легко выбрать его габариты. При этом необходимо учитывать, что при работе конденсатора в режиме большого числа импульсов в секунду, когда возникает опасность перегрева конденсатора, для увеличения поверхности теплоотдачи и улучшения теплоотвода от внутренней части конденсатора (уменьшения температурного перепада между центральной частью конденсатора и баком) целесообразно один из размеров выбирать значительно меньше двух других.

В ряде случаев указанный выбор размеров производится также для увеличения ширины токоведущих шин, располагаемых вдоль широкой стороны конденсатора для уменьшения его индуктивности.

Рабочее напряжение секции конденсатора определяется формулой

$$U_c = E_p d_c, \quad (66)$$

где d_c — толщина изоляции секции.

При указанных в табл. 6 величинах рабочих напряженностей и толщинах диэлектрика, выбранных по условиям, изложенным в гл. 2, § 7 (обычно 80—120 мкм), рабочее напряжение секции конденсатора обычно не превосходит 5—10 кВ. Поэтому

при номинальных напряжениях 15—20 кВ и выше конденсаторы собираются из нескольких последовательно соединенных секций или групп секций. В последнем случае в группах секций соединяются параллельно. При этом число последовательно соединенных секций или групп

$$n_c = U_p / U_c, \quad (67)$$

а емкость секции или группы

$$C_c = C_k n_c. \quad (68)$$

По технологическим соображениям емкость секции при напряжении 5—10 кВ не должна превосходить 1,5—2,0 мкф. Поэтому, если C_c окажется больше этой величины, то секция разбивается

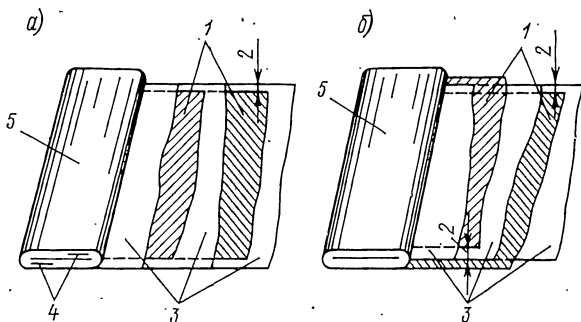


Рис. 39. Способы намотки секций: а — со скрытой фольгой; б — с выступающей фольгой

1 — обкладки; 2 — закраина; 3 — листы бумаги; 4 — выводы секции; 5 — секция

на несколько параллельно включенных более мелких секций.

Геометрические размеры секции задают, исходя из емкости секции, формы пакета секций и расположения секций в пакете. Это расположение во многом определяет индуктивность пакета секций (см. гл. 4). Исходя из желательных размеров секции выбирается ширина рулонов бумаги b и диаметр оправки D_0 , на которую наматывается секция. Ширина фольги b_f выбирается в соответствии с шириной бумаги b .

Для секций со скрытой фольгой (рис. 39, а) ширина фольги выбирается несколько уже ширины бумаги — на удвоенную величину закраины l_3 , которая из технологических соображений принимается равной 7—10 мм. Таким образом,

$$b_f = b - 2l_3. \quad (69)$$

В секциях с выступающей фольгой (рис. 39, б) ширина фольги выбирается так, чтобы фольга выступала с каждого торца секции на 2—3 мм от краев бумаги, что позволяет соединить все витки фольги с торцевых сторон секции.

Для намотанной на цилиндрическую оправку секции длина обкладки

$$l = \pi D_{\text{ср}} N, \quad (70)$$

где N — число витков при намотке секции; $D_{\text{ср}} = (D_{\text{н}} + D_{\text{о}})/2$ — средний диаметр секции; $D_{\text{о}}$ — диаметр оправки; $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр секции.

Учитывая, что при каждом витке наматываются две фольги и два слоя диэлектрика секции (см. рис. 39),

$$N = \frac{D_{\text{н}} - D_{\text{о}}}{4(d_{\text{с}} + d_{\text{ф}})}. \quad (71)$$

Когда лента из двойного слоя диэлектрика с двумя обкладками наматывается в спираль, то оба слоя диэлектрика попадают в поле между обкладками и емкость секции будет приблизительно в два раза больше, чем в развернутом состоянии:

$$C_{\text{с}} = \frac{2\varepsilon S}{d_{\text{с}}} = \frac{2\varepsilon \pi D_{\text{ср}} b_{\text{ф}} N}{d_{\text{с}}}. \quad (72)$$

Из (71) и (72) имеем

$$D_{\text{н}} = \sqrt{D_{\text{о}}^2 + \frac{4(d_{\text{с}} + d_{\text{ф}})C_{\text{с}}d_{\text{с}}}{\varepsilon \pi d_{\text{ф}}}}. \quad (73)$$

Ширина сплюсненной секции

$$H = \frac{\pi D_{\text{о}}}{2} + 4N(d_{\text{с}} + d_{\text{ф}}), \quad (74)$$

а толщина сплюсненной секции

$$h = 4N(d_{\text{с}} + d_{\text{ф}}). \quad (75)$$

Зная размеры секции, легко определить размеры пакета секций и уточнить размеры бака конденсатора.

13. Определение размеров выводов и внешней изоляции импульсных конденсаторов

а. Определение аксиальных (продольных) размеров внешней изоляции

Аксиальные размеры выводов (высота воздушной части и высота масляной части), а также размеры внешней изоляции при выполнении конденсаторов в изоляционном корпусе определяются на основании испытательного напряжения конденсаторов.

Импульсные конденсаторы испытываются постоянным напряжением, причем испытательное напряжение по отношению к рабочему для импульсных конденсаторов обычно меньше, чем для конденсаторов промышленной частоты или постоянного напряжения, и составляет 1,2—1,5 $U_{\text{р}}$. Это объясняется значительно

более высокими рабочими напряженностями в импульсных конденсаторах по сравнению с конденсаторами других типов.

На рис. 40 приведены разрядные характеристики по поверхности фарфора и бакелитовых цилиндров в воздухе и в масле при постоянном напряжении. На основании этих кривых, принимая 10—15%-ный запас по разрядному напряжению относительно испытательного, можно определить соответствующие характеристики выводов и внешней изоляции.

В ряде случаев для уменьшения масляной части выводов применяется система изоляционных барьеров и покрытий токоведущих частей. Широко применяется изоляционная крышка, обеспечивающая требуемую изоляцию вывода конденсатора от

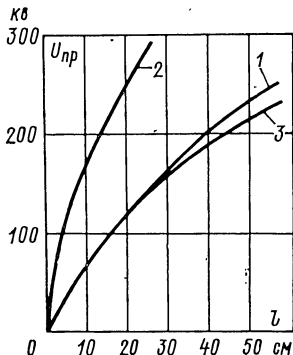


Рис. 40. Разрядное напряжение выводов

1 — постоянное напряжение, разряд по поверхности в воздухе; 2 — постоянное напряжение, разряд по поверхности в масле; 3 — импульсное напряжение, разряд по поверхности в воздухе

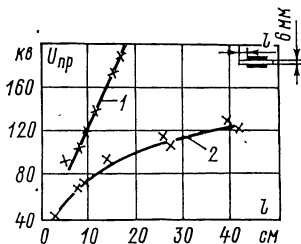


Рис. 41. Зависимость разрядного напряжения по поверхности винипласта в воздухе от длины уступа. Толщина винипласта 6 мм

1 — постоянное напряжение; 2 — колебательный импульс, $f = 29$ кГц, $\Delta = 1,1$

металлического бака. Выбор необходимых расстояний может быть произведен по кривым рис. 41. При выборе проходных изоляторов (выводов) конденсатора следует учитывать, что разрядные напряжения этих изоляторов в импульсном разрядном режиме могут быть ниже, чем при постоянном напряжении (рис. 40). В связи с этим возможно возникновение частичного или полного перекрытия проходного изолятора в процессе разряда конденсатора. Это происходит вследствие более неравномерного распределения напряжения по поверхности изолятора в импульсном режиме по сравнению с постоянным напряжением, что следует из рассмотренной эквивалентной схемы замещения вывода, которая аналогична схеме рис. 16.

Анализ этой схемы показывает, что распределение напряжения по поверхности изолятора вывода определяется выражением:

$$u_x = U \left[1 - \frac{\text{sh } m (l_B - x)}{\text{sh } m l_B} \right], \quad (76)$$

где l_v — длина воздушной части изолятора; U — напряжение на выводе конденсатора относительно корпуса; $m = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{k\varepsilon_0 d_1}}$;

d_1 — толщина изоляции вывода; ε_1 — эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции вывода; ε_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха; k — коэффициент пропорциональности.

Для конструкции вывода с фарфоровым изолятором, изображенной на рис. 75,

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_\phi \varepsilon_d}{\varepsilon_\phi d_d + \varepsilon_d d_\phi},$$

где ε_ϕ и d_ϕ — соответственно диэлектрическая проницаемость и толщина фарфора; ε_d и d_d — соответственно диэлектрическая

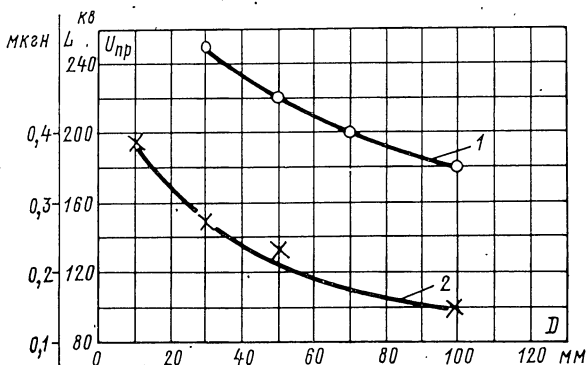


Рис. 42. Зависимость разрядного напряжения (1) при колебательных импульсах ($f=40$ кГц) и индуктивности ввода (2) от диаметра D стержня ввода конденсатора на номинальное напряжение 150 кВ, высота изолятора 340 мм, диаметр изолятора 200 мм (эскиз конденсатора см. рис. 75)

проницаемость и толщина изоляционной прослойки между токоведущим стержнем и внутренней поверхностью фарфорового диэлектрика.

Разрядные напряжения по поверхности выводов зависят от конструкции изолятора (толщины диэлектрика изолятора, наличия ребер на поверхности изолятора).

Увеличение диаметра токоведущего стержня в выводе и сокращение зазора между стержнем и внутренней поверхностью изолятора, целесообразное с точки зрения уменьшения индуктивности вывода, приводит к снижению разрядных напряжений при импульсных воздействиях вследствие увеличения удельной поверхностной емкости C_1 . На рис. 42 в качестве примера показаны зависимости разрядных напряжений одной из конструкций

вывода и индуктивности вывода от диаметра токоведущего стержня D .

Во избежание разрядов при импульсном напряжении следует проверять размеры изоляторов, выбранные по испытательному напряжению постоянного тока, на отсутствие разрядов при рабочем импульсном напряжении по кривой 3 рис. 40.

6. Определение радиальных (поперечных) размеров внешней изоляции

Радиальные размеры проходных изоляторов (толщина фарфора, толщина барьера между выводами и т. д.) определяются на основании испытательного напряжения конденсаторов, которое должно быть ниже на 30—50% пробивного напряжения изоляции.

На рис. 43 приведены зависимости пробивного напряжения фарфорового изолятора от толщины его стенки при различных значениях радиуса внутренней полости [30].

По этим кривым могут быть выбраны радиальные или поперечные размеры изоляции вводов.

При применении фарфорового изолятора обычно между токоведущим стержнем и внутренней поверхностью изолятора имеется воздушная полость. В этой полости могут возникнуть разряды, если напряженность на поверхности токоведущего стержня превысит величину пробивной напряженности воздуха

$$E_{\text{пр}} = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_{\text{ст}}\delta}} \right), \quad (77)$$

где δ — относительная плотность воздуха; $r_{\text{ст}}$ — радиус токоведущего стержня, см; $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность, кВ/см (амплитудное значение).

Разряды внутри проходного изолятора могут быть исключены, если внутренняя полость будет залита маслом. Целесообразно также покрытие токоведущего стержня слоями кабельной бумаги или синтетической изоляционной пленки. При заполнении полости маслом разряды возникают, если напряженность на поверхности токоведущего стержня превысит величину пробивной напряженности масла [30], амплитудное значение которой

$$E_{\text{пр}} = 10 \left(1 + \frac{11,7}{\sqrt{r_{\text{ст}}}} \right), \quad \text{кВ/см.} \quad (78)$$

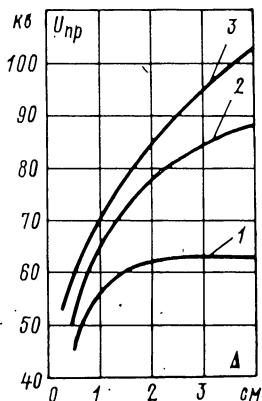


Рис. 43. Зависимость пробивного напряжения фарфорового изолятора от толщины его стенки при разных значениях радиуса внутренней полости

1 — $r = 1$ см; 2 — $r = 2$ см;
3 — $r = 3$ см

Напряженность на поверхности токоведущего стержня определяется по формуле для цилиндрического многослойного конденсатора

$$E_{\text{ст}} = \frac{U}{\varepsilon_{\text{д}} r_{\text{ст}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{д}}} \ln \frac{r_1}{r_{\text{ст}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ф}}} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)},$$

где $\varepsilon_{\text{д}}$ — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей зазор между стержнем и фарфором; $\varepsilon_{\text{ф}}$ — диэлектрическая проницаемость фарфора; r_1 и r_2 — внутренний и наружный радиусы фарфорового изолятора.

Глава 4

ИНДУКТИВНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

14. Общие положения

Импульсные конденсаторы в большинстве случаев работают в режиме колебательного или аperiodического разряда емкости самого конденсатора на ту или иную индуктивность. При этом эквивалентная частота разряда конденсатора всегда представляет собой резонансную частоту колебаний емкости самого конденсатора и суммарной индуктивности (внутренней и внешней).

Для обеспечения минимальной индуктивности всего колебательного контура генератора больших импульсных токов в конденсаторах в ряде случаев требуется минимальная собственная индуктивность. Однако уменьшение внутренней индуктивности конденсатора, предназначенного для работы в генераторах импульсных токов (ГИТ), должно иметь разумно выбранный предел. Очевидно, что нерационально снижать внутреннюю индуктивность конденсатора ниже величины, при которой общая индуктивность конденсаторов, включенных в генератор, составляет менее 10% от общей индуктивности генератора в режиме короткого замыкания.

При расчете параметров высоковольтных импульсных конденсаторов распределение тока по ширине обкладки можно считать равномерным.

Величина собственной индуктивности конденсаторов в целом состоит из индуктивности его отдельных элементов: секций, внутренних соединений (соединительных шин) и выводов. Индуктивность выводов в ряде случаев зависит от конструкции соединения конденсаторов в батарее.

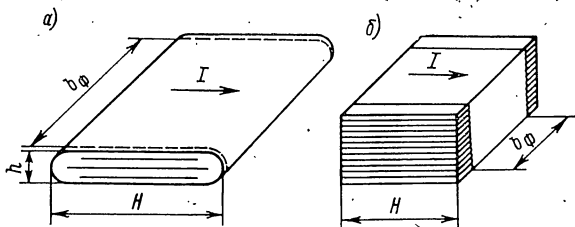


Рис. 44. Эскизы рулонной секции (а) и пакета пластинчатых секций (б)

Конденсаторные секции по способу выполнения обкладок могут быть разбиты на две основные группы: рулонные (рис. 44, а) и пластинчатые (рис. 44, б).

15. Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями

Индуктивность рулонных секций определяется ее геометрическими размерами, количеством выводов, размерами выводов и их расположением.

а. Индуктивность обкладок секций

Рассмотрим простейший случай, при котором секция имеет только два вывода. При этом возможны два варианта их расположения: 1) выводы заложены непосредственно друг против друга (рис. 45); 2) выводы смещены друг относительно друга по длине обкладок (рис. 46).

В первом случае при расположении выводов с одного конца обкладок секцию можно заменить эквива-

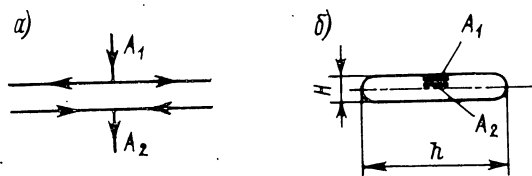


Рис. 45. Секция конденсатора с выводами A_1 и A_2 разной полярности, расположенными непосредственно друг над другом: а — схема прохождения тока в секции; б — способ закладки выводов друг над другом

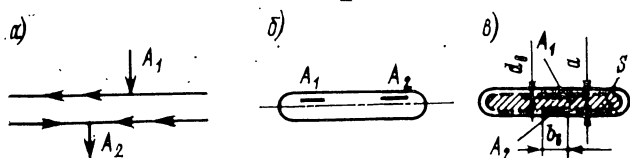


Рис. 46. Секция конденсатора с выводами A_1 и A_2 разной полярности, смещенными друг относительно друга по длине обкладок: а — схема прохождения тока в секции; б — смещение выводов в пределах ширины секции; в — смещение выводов на 0,5 оборота или на число, кратное 0,5 оборота

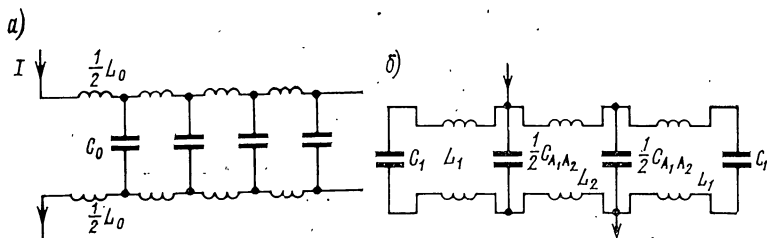


Рис. 47. Эквивалентная схема замещения секции конденсатора с выводами, расположенными непосредственно друг над другом (без учета потерь) (а) и упрощенная эквивалентная схема замещения секции с выводами, смещенными относительно друг друга по длине обкладок (б) L_0 — индуктивность на единицу длины обкладок; C_0 — емкость на единицу длины обкладок; L_1 — индуктивность бифилярно расположенных частей обкладок; L_2 — индуктивность участка обкладок между смещенными выводами A_1 и A_2 ; C_1 — емкость бифилярно расположенных частей обкладок; C_{A_1, A_2} — емкость участка $A_1 A_2$, распределенная по длине этого участка

лентной схемой (рис. 47, а). При оценке индуктивности обкладок секции L_1 в первом приближении можно представить обе обкладки как бесконечные полосы, обтекаемые током в разных направлениях [31].

Тогда в случае равномерного распределения тока по сечениям обкладок индуктивность их можно оценить по формуле:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l_{\text{экв}}}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} (3\beta - \delta) - \frac{25}{12} \beta^2 - \frac{1}{12} \beta^4 - \frac{1}{12} \beta^2 \delta^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{12\delta^2} (\xi^4 \ln \xi - 2\beta^4 \ln \beta + \gamma^4 \ln \gamma - 2\delta^4 \ln \delta) \right], \quad (79)$$

$$\text{где } \xi = \frac{2d_\phi + d_c}{b_\phi}; \quad \beta = \frac{d_\phi + d_c}{b_\phi}; \quad \gamma = \frac{d_c}{b_\phi}; \quad \delta = \frac{d_\phi}{b_\phi};$$

d_c — толщина диэлектрика (расстояние между обкладками); b_ϕ — ширина обкладок (фольги); d_ϕ — толщина обкладок (фольги); $l_{\text{экв}}$ — эквивалентная длина обкладок.

Если взять за основу обычные размеры секции и фольги, при которых $b_\phi \gg d_c$ и $b_\phi \gg d_\phi$, то выражение (79) принимает вид:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l_{\text{экв}}}{3} \left(\frac{2d_\phi + 3d_c}{b_\phi} \right). \quad (80)$$

В большинстве случаев $d_c \gg d_\phi$, тогда

$$L_1 = \frac{\mu_0 d_c l_{\text{экв}}}{b_\phi}. \quad (81)$$

При определении эквивалентной индуктивности обкладок необходимо учитывать, что ток линейно уменьшается вдоль обкладок. При наличии одной пары выводов, расположенной с одного конца секции, при разряде конденсатора на индуктивность, существенно превышающую индуктивность конденсатора,

$$i = i_0 \frac{l - x}{l}, \quad (82)$$

где i_0 — величина тока в начале секции в месте расположения выводов, l — геометрическая длина обкладки, x — расстояние от начала секции (место расположения выводов) до рассматриваемой точки по длине шины. В этом случае эквивалентная длина

обкладок может быть определена, если в качестве критерия эквивалентности двух систем принять равенство энергий, запасаемых в индуктивностях. Энергия W_1 , запасаемая в индуктивности обкладок секций,

$$W_1 = \int_0^l \frac{L_{\text{уд. об}} \left(i_0 \frac{l-x}{l} \right)^2}{2} dx = L_{\text{уд. об}} \frac{i_0^2 l}{2 \cdot 3}, \quad (83)$$

где $L_{\text{уд. об}} = \mu_0 d_0 / b_{\phi}$ — индуктивность обкладок на единицу длины. Примем эквивалентную индуктивность обкладок

$$L_1 = L_{\text{уд. об}} l_{\text{экв}}. \quad (84)$$

Энергия, запасаемая в эквивалентной индуктивности L_1 , равна также W_1 :

$$W_1 = \frac{i_0^2 L_1}{2} = L_{\text{уд. об}} \frac{i_0^2 l_{\text{экв}}}{2}. \quad (85)$$

Из (83) и (85) для эквивалентной длины секции $l_{\text{экв}}$ имеем

$$l_{\text{экв}} = l/3. \quad (86)$$

При разряде конденсатора на индуктивность, существенно меньшую индуктивности конденсатора, эквивалентная длина обкладки может быть определена по первой гармонике колебаний $l_{\text{экв}} = \frac{4l}{\pi^2} = 0,4l$.

Если один вывод смещен относительно другого по длине фольги, то упрощенная эквивалентная схема замещения секции для этого случая изображена на рис. 47, б.

Индуктивность L_1 (бифилярно расположенных частей обкладок) в первом приближении может быть оценена по формуле (80). Индуктивность участка секции между двумя смещенными выводами зависит от взаимного расположения выводов. Если выводы сдвинуты по длине фольги обкладок в пределах ширины секции (рис. 46, б), то в этом случае индуктивность L_2 участка фольги, на котором токи в обеих обкладках направлены согласно (с учетом взаимной индуктивности) при приблизительном равенстве токов

в соседних обкладках на этом участке, может быть определена по формуле:

$$L_2 = \frac{\mu_0 l_{12}}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_{12}}{b_\phi} + \frac{1}{2} \right). \quad (87)$$

где l_{12} — длина участка обкладки между выводами; b_ϕ — ширина обкладки (фольги).

Если выводы сдвинуты по длине фольги на 0,5 оборота (рис. 46, в), то в этом случае L_2 будет определяться геометрическими размерами петли, образованной фольгой при ее намотке на пол оборота, т. е. будет зависеть от толщины фольги d_ϕ , ее ширины b_ϕ , длины петли l и толщины всех предшествующих слоев (расстояния a). При этом индуктивность L_2 определится по формуле:

$$L_2 = \frac{\mu_0 l}{3} \left(\frac{2d_\phi + 3a}{b_\phi} \right) \approx \frac{\mu_0 la}{b_\phi}.$$

Если выводы сдвинуты на один оборот по длине обкладок, то индуктивность этого витка фольги, являющаяся искомой индуктивностью L_2 , определится из соотношения

$$L_2 = \mu_0 S / b_\phi, \quad (88)$$

где S — площадь поперечного сечения витка фольги.

При смещении выводов на несколько оборотов индуктивность будет определяться индуктивностью нескольких витков фольги, расположенных между выводами. Для расчета L_2 также можно воспользоваться (88), но применительно к нескольким виткам фольги с учетом их коэффициентов взаимной индукции:

$$L_2 = \frac{\mu_0}{b_\phi} [n^2 S_0 + (n-1)^2 S_1 + (n-2)^2 S_2 + \dots + S_{n-1}], \quad (89)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения первого витка; $S_1, S_2, \dots, S_{n-1}$ — разность между площадями сечения первого и второго витков фольги, второго и третьего, $(n-1)$ -го и n -го витков.

Если один из выводов расположен в начале намотки, то большей частью можно приблизительно считать, что $S_0 = S_1 = S_2 = \dots = S_{n-1}$. Тогда (89) примет вид:

$$L_2 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)^2 \frac{\mu_0 S_k}{b_\phi} = \frac{\mu_0 S_0}{b_\phi} \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)^2. \quad (90)$$

Если один вывод расположен в любой точке по длине обкладки, а второй смещается относительно него по другой обкладке на n оборотов, то тогда $S_0 \neq S_1 = S_2 = \dots = S_{n-1}$, и формула (89) может быть представлена в следующем виде:

$$L_2 = n^2 \frac{\mu_0 S_0}{b_{\Phi}} + \frac{\mu_0 S_1}{b_{\Phi}} \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)^2, \quad (91)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения внутреннего витка обкладки, на котором расположен один из выводов; S_1 — разность между площадями сечения соседних витков, которые могут быть приняты приблизительно одинаковыми.

6. Индуктивность выводов секций

В конденсаторных секциях рулонного типа выводы выполняются в основном в виде медных полос и располагаются для уменьшения индуктивности с одного торца.

Индуктивность выводов секции при смещении их в пределах ширины секции (рис. 46, б) может быть определена по формуле:

$$L_3 = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{\pi} \left(\ln \frac{D}{b_{\text{в}}} + \frac{3}{2} \right), \quad (92)$$

где $b_{\text{в}}$ — ширина вывода; $l_{\text{в}}$ — длина вывода; D — расстояние между осями выводов. При смещении выводов на 0,5 оборота или на длину фольги, кратную 0,5 оборота, и расположении их друг против друга, индуктивность выводов рассчитывается по формуле, аналогичной (80),

$$L_3 = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{3} \left(\frac{2d_{\text{в}} + 3a}{b_{\text{в}}} \right), \quad (93)$$

где a — расстояние между выводами; $d_{\text{в}}$ — толщина выводов (см. рис. 46, в):

Формула справедлива для случая равномерного распределения тока по сечению выводов, что имеет место при частотах до $(1-1,5) \cdot 10^6$ гц при толщине выводов около 0,05 мм.

При более высоких частотах в шинах происходит вытеснение тока к их внутренней поверхности, что соответствует условию $a \gg d_v$, и тогда справедлива формула, аналогичная (81).

в. Индуктивность секций

При расчете индуктивности секции в целом обычно можно пренебречь емкостью секции на участке между смещенными выводами, так как она значительно меньше емкости всей секции. При этом в случае расположения выводов у середины обкладок суммарная индуктивность секции будет определяться суммой индуктивностей

$$L_c = \frac{1}{2} L_1 + L_2 + L_3. \quad (94)$$

Если выводы не смещены и расположены непосредственно один против другого по середине обкладок, то $L_c = \frac{1}{2} L_1 + L_3$. Однако такое расположение выводов конструктивно не всегда целесообразно, так как затрудняет параллельное соединение секции.

Для оценки влияния на индуктивность секции места расположения выводов, их относительного смещения и их количества рассмотрим следующие варианты конструктивного выполнения секции [32].

1. Выводы располагаются непосредственно друг под другом; место расположения их изменяется по длине обкладок.

2. Выводы смещены друг относительно друга на поворот по длине обкладок. Место расположения их изменяется по длине обкладок.

3. Один вывод смещается относительно другого по длине обкладки на число оборотов, кратное 0,5 оборота.

4. Выводы расположены посередине обкладок и смещаются относительно друг друга в пределах ширины секции.

5. Секция имеет несколько выводов на каждой обкладке, равномерно расположенных по ее длине.

На рис. 48 приведены соответствующие зависимости индуктивности секции от места расположения

выводов по длине обкладок. Все данные приведены для конденсаторной секции емкостью $1,0 \text{ мкф}$ с толщиной диэлектрика 80 мкм при ширине фольги 280 мм .

Из рис. 48, а следует, что при отсутствии смещения выводов друг относительно друга индуктивность

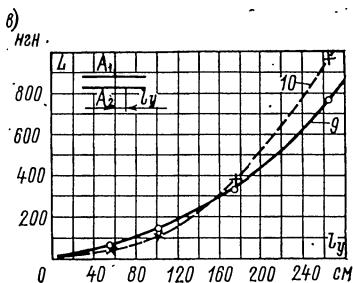
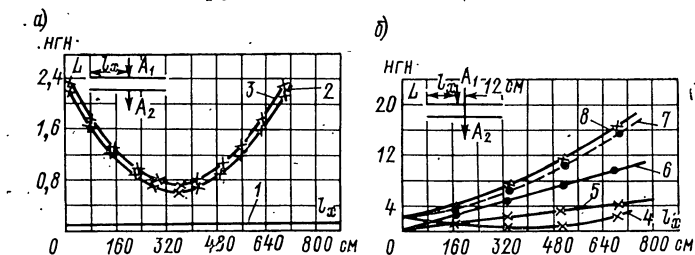


Рис. 48. Зависимость индуктивности секции рулонного типа от места расположения выводов по длине обкладок, $C = 1,0 \text{ мкф}$, $d_c = 8 \times 10 \text{ мкм}$; а — выводы A_1 и A_2 лежат непосредственно друг над другом. Начало отсчета соответствует началу намотки секции; б — выводы сдвинуты друг относительно друга на 0,5 оборота по длине обкладок; в — выводы смещены по длине обкладок, вывод A_1 заложен на середине обкладки секции

1 — индуктивность выводов секции; 2 — индуктивность обкладок секции; 3 — суммарная индуктивность секции; 4 — индуктивность бифилярно расположенных концов обкладок секций (расчет); 5 — индуктивность части обкладок между выводами (расчет); 6 — индуктивность выводов (расчет); 7 — суммарная индуктивность секции (расчет); 8 — суммарная индуктивность секции (опыт); 9 — опыт; 10 — расчет

секции в зависимости от места расположения выводов на обкладках меняется в ограниченных пределах, причем величина индуктивности остается незначительной, менее $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мкГН}$ при любом месте расположения выводов.

Во втором случае (рис. 48, б), когда выводы сдвинуты друг относительно друга на 0,5 оборота, индуктивность секции существенно возрастает при увеличении расстояния от начала намотки, что объясняется

значительным увеличением индуктивности L_2 и L_3 вследствие увеличения размера a за счет толщины предшествующих слоев при намотке. При расположении выводов в начале намотки секции индуктивность не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$ мкГн, при расположении выводов в конце секции — возрастает до $16 \cdot 10^{-3}$ мкГн.

В третьем случае, когда выводы сдвинуты друг относительно друга на полоборота или число, кратное 0,5 оборота по длине обкладки (рис. 48, в), индуктивность секции резко возрастает за счет индуктивности средних частей обкладок, расположенных между выводами и обтекаемых током в одном направлении. Так, например, при увеличении смещения между выводами от 0,5 оборота (11,6 см) до 11,5 оборота (267 см) индуктивность секции возрастает от $2 \cdot 10^{-3}$ мкГн до 0,76 мкГн.

В четвертом случае, когда выводы смещаются относительно друг друга в пределах ширины секции, они делаются значительно более узкими. Минимальное расстояние между ними выбирается из условия отсутствия перекрытия между выводами различной полярности, максимальное — из возможной ширины секции. Индуктивность секции в основном определяется индуктивностью выводов и резко возрастает при увеличении расстояния между выводами: от $0,25 \cdot 10^{-3}$ мкГн (выводы расположены непосредственно друг под другом) до $15 \cdot 10^{-3}$ мкГн.

В пятом случае секция имеет на каждой обкладке несколько выводов, равномерно расположенных по длине фольги. Наиболее распространенным конструктивным выполнением секции здесь является смещение выводов одной полярности на полоборота по длине обкладок относительно выводов другой полярности, так как при этом обеспечивается надежная изоляция между ними (рис. 49, а).

Можно было ожидать [33] значительного уменьшения индуктивности секции за счет дробления секции на параллельно включаемые ветви. Однако из рассмотрения кривой б рис. 48, б следует, что индуктивность различных пар выводов существенно различна и возрастает от $0,25 \cdot 10^{-3}$ мкГн при их расположении в начале обкладок до $10 \cdot 10^{-3}$ мкГн при их расположении в конце обкладок.

Так как индуктивность обкладок на участках между выводами при достаточно широкой фольге чаще всего значительно меньше индуктивности соответствующей пары выводов, смещенной относительно начала секции, то все дополнительные выводы будут шунтированы основными обкладками и практически не примут участия в токораспределении. При этом весь ток будет вытесняться на первую пару выводов, расположенную в начале намотки и обладающую

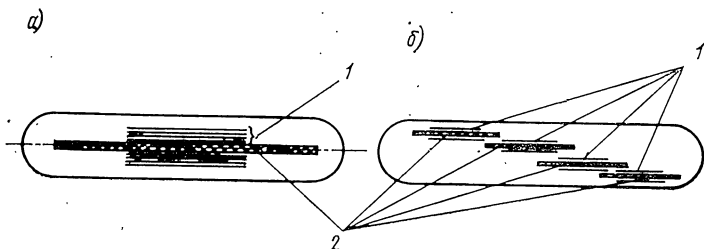


Рис. 49. Варианты размещения нескольких выводов в секции, равномерно расположенных по длине обкладки: а — в каждой паре выводов один смещен относительно другого на 0,5 оборота; б — в каждой паре выводов один расположен непосредственно над другим

1 — выводы одной полярности; 2 — изоляция между выводами

наименьшей индуктивностью. Следовательно, в секциях с широкой фольгой ($b_{\phi} > 200$ мм) ожидаемого уменьшения индуктивности для конструкции с большим количеством выводов по сравнению с конструкцией с двумя выводами, расположенными в начале обкладок, почти не будет.

Этот способ целесообразен главным образом для секций с малой шириной фольги ($b_{\phi} < 100$ мм). В этом случае для увеличения количества выводов целесообразно применять фольгу специальной конфигурации, с выступами на боковых краях (рис. 50). При намотке выступы каждой из обкладок располагаются по разные стороны от изоляционной прокладки и соединяются вместе [34, 35].

Уменьшение индуктивности секции с широкой фольгой возможно следующими путями: а) делением секции на несколько секций меньшей емкости, при-

чем в каждой из них каждая пара выводов в пакете секций смещается одна относительно другой, согласно рис. 51, а; б) увеличением числа пар выводов в секции, равномерно распределенных по длине фольги и смещенных по торцу намотанной секции одна относительно другой (см. рис. 49, б).

Необходимо учитывать, что в рулонной секции каждый виток имеет емкость не только между обкладками этого витка, но и между соседними обклад-

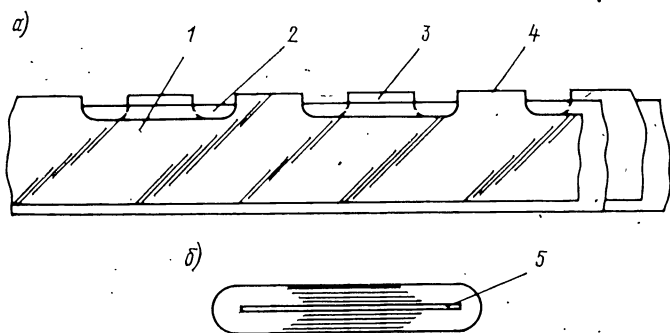


Рис. 50. Эскиз секции малоиндуктивного конденсатора со специальной формой обкладок: а — эскиз формы обкладок; б — расположение выступов обкладок на торце секции

1 — обкладка; 2 — диэлектрик; 3 — выступ на краю обкладки; 4 — утолщение; 5 — изоляционная прокладка

ками противоположной полярности смежных витков. Поэтому при наличии двух выводов в секции, в которой выводы расположены непосредственно друг под другом по рис. 45, б, схема рис. 47, а справедлива только для половины емкости секции, образованной двумя ненамотанными обкладками. Для емкости, образованной смежными витками в процессе намотки секции, будет справедлива эквивалентная схема рис. 47, б, так как для этой емкости выводы смещены на один оборот по длине обкладок (рис. 52, а). Учитывая это обстоятельство, для уменьшения индуктивности секции необходимо иметь три вывода, из которых один расположен на одной обкладке, а два других — на двух соседних витках противоположной обкладки с двух сторон относительно первого в соот-

ветствии с рис. 52, б [36]. При наличии нескольких пар выводов (рис. 49, б) необходимо их чередовать так, чтобы они соответствовали рис. 45, б, как для емкости, образованной ненамотанными обкладками секций, так и для емкости, образованной смежными витками.

Для обеспечения минимальной индуктивности пакета, состоящего из последовательно соединенных групп секций; при m_c параллельно соединенных сек-

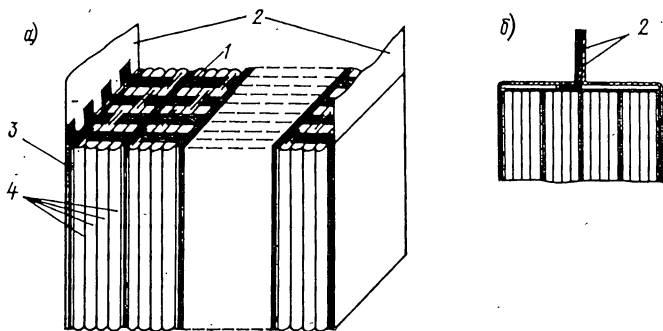


Рис. 51. Схема малоиндуктивного соединения секций в пакете конденсатора: а — схема соединения секций; б — схема расположения токоведущих шин

1 — соединение выводов секции; 2 — токоведущие шины из меди, при сборке отгибаются к пакету; 3 — изоляция из кабельной бумаги между группами секций; 4 — группа секций, состоящая из четырех секций, заменяющих секцию большей емкости

циях в каждой группе, секции со смещенными выводами соединяются последовательно через $m_c - 1$ секцию (рис. 51, а).

На рис. 53 приведен пример более простого соединения секций, в котором, однако, возникает большая индуктивность контура за счет относительного смещения выводов по ширине секции.

Следует учитывать, что при наличии в пакете последовательно соединенных секций применение так называемой «безындукционной» намотки с выступающей по торцам секции фольгой (см. рис. 39, б) приводит к значительной индуктивности всего пакета. Это объясняется тем, что ток идет зигзагообразно,

причем индуктивность каждого зигзага определяется эквивалентной индуктивностью петли из двух шин (сечением, равным поперечному сечению секции, с противоположным направлением токов при весьма малом расстоянии между шинами) и взаимной индуктивностью соседних петель. Так как ток в рассматриваемом случае следует считать равномерно

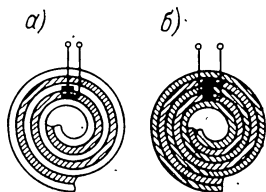


Рис. 52. Схема намотки секций конденсатора: а — при наличии двух выводов, расположенных друг над другом; б — при наличии трех выводов, расположенных друг над другом. Заштрихованная часть — емкость, для которой выводы расположены непосредственно друг над другом

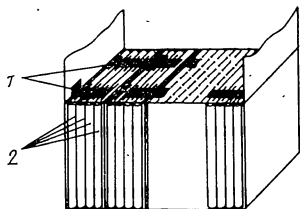


Рис. 53. Схема соединения секций в пакете, приводящая к большой индуктивности конденсатора

1 — выводы секций; 2 — группа секций, состоящая из четырех параллельно соединенных секций

распределенным по сечению шины, то индуктивность такой пары L_6 в первом приближении определяется их длиной (шириной фольги секции b_ϕ) и средним геометрическим расстоянием площадей поперечных сечений секции g_{11} и соседних секций g_{12} [37]:

$$L_6 = \frac{\mu_0}{\pi} b_\phi \ln \frac{g_{12}}{g_{11}}. \quad (95)$$

При обычных размерах секции: $b_\phi = 28$ см, толщине секции 1,0 см, ширине секции 10 см имеем $L_6 = 50 \cdot 10^{-3}$ мкГн, что является недопустимо большим. Как было показано выше, в секциях с выводами, расположенными с одного торца, можно обеспечить индуктивность на два порядка меньше.

г. Индуктивность предохранителей

В ряде случаев при параллельном соединении секций каждая секция соединяется с общей шиной плавким предохранителем, сгорающим при пробое секции.

Индуктивность предохранителя $L_{\text{пр}}$ зависит от его размеров и расположения относительно токоведущих частей конденсатора. Если предохранитель расположен параллельно направлению тока в обкладках секций, индуктивность его можно определить как для системы провод — плоскость [37]:

$$L_{\text{пр}} = \frac{\mu_0 l_{\text{пр}}}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_{\text{пр}}}, \quad (96)$$

где $l_{\text{пр}}$ — длина предохранителя; h — расстояние между предохранителем и торцевой частью обкладки секции; $r_{\text{пр}}$ — радиус провода предохранителя. Формула (96) справедлива при $r_{\text{пр}} \ll h$.

д. Индуктивность выводов конденсатора

Для уменьшения индуктивности конденсатора иногда вывод (или выводы каждой из полярностей) выполняется из нескольких стержней (болтов), соединенных параллельно, или в виде плоских шин. При этом выводы различных полярностей разделяются изолирующей перегородкой (см. рис. 68). Иногда выводы выполняются в виде двух коаксиальных цилиндров, также разделенных изолирующей перегородкой (см. рис. 67, 69, а).

Рассмотрим случай, когда выводы конденсатора одной полярности выполняются в виде ряда стержней (болтов), а другой полярности — в виде шины. Если расстояние между соседними стержнями одинаковой полярности $a_{\text{в}}$ значительно больше расстояния $d_{\text{в}}$ от стержня до шины противоположной полярности, то индуктивность выводов $L_{\text{в}}$ можно определить как для системы провод — плоскость, пренебрегая взаимной индукцией между соседними стержнями одинаковой полярности:

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{N 2\pi} \ln \frac{2d_{\text{в}}}{r_{\text{в}}}, \quad (97)$$

где $l_{\text{в}}$ — длина токоведущей части стержня; $r_{\text{в}}$ — радиус стержня; $d_{\text{в}}$ — расстояние между осью стержня и плоскостью шины; N — число стержней одной полярности.

В тех случаях, когда выводы обеих полярностей выполняются в виде стержней (болтов), причем расстояния между стержнями одной полярности много больше расстояния между стержнями противоположных полярностей, то индуктивность выводов можно определить как для системы провод — провод, пренебрегая взаимоиндукцией между стержнями соседних пар:

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{N\pi} \ln \frac{d_{\text{в}}}{r_{\text{в}}}, \quad (98)$$

где $d_{\text{в}}$ — ближайшее расстояние между стержнями противоположных полярностей.

В случае, когда расстояние между стержнями одинаковой полярности $a_{\text{в}}$ равно или меньше расстояния $d_{\text{в}}$ от стержня до шины противоположной полярности или расстояния между ближайшими стержнями противоположной полярности, то необходимо учитывать взаимную индукцию между стержнями как одинаковой полярности, так и противоположных полярностей. При этом, если выводы расположены в ряд, то индуктивность их равна [38]:

$$\begin{aligned} L_{\text{в}} &= \mu_0 l_{\text{в}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{a_{\text{в}}}{2\pi b_{\text{ш}}} \ln \frac{a_{\text{в}}}{2\pi r_{\text{в}}} \right) = \\ &= \mu_0 l_{\text{в}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{a_{\text{в}}}{2\pi r_{\text{в}}} \right), \end{aligned} \quad (99)$$

где $b_{\text{ш}}$ — ширина шины или ширина участка, на котором расположены стержни одинаковой полярности (в последнем случае $b_{\text{ш}} = a_{\text{в}} N$).

Если стержни вывода одной полярности расположены по окружности с радиусом R_1 , а вывода противоположной полярности — по окружности с радиусом R_2 ($R_1 > R_2$, окружности концентрические) или вывод противоположной полярности выполнен в виде цилиндра с радиусом R_2 , то индуктивность выводов

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{2\pi} \left(\ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{R_1}{Nr_{\text{в}}} \right). \quad (100)$$

В формулах (99) и (100) первый член соответствует индуктивности системы с непрерывным распределением тока либо по плоскости, эквивалентной плоскости расположения стержней одинаковой полярности (99), либо по окружности радиуса R_1 (100), второй член учитывает дискретный характер протекания тока.

е. Индуктивность шин, соединяющих секции конденсатора с выводами, и индуктивность конденсатора

Способ соединения пакета секций, главных шин и выводов конденсатора и другие конструктивные особенности в большой мере сказываются на величине его индуктивности.

Ниже рассмотрено несколько возможных вариантов конструкции конденсатора.

Первый случай наиболее характерен для большого количества последовательно соединенных секций или групп секций в пакете, при котором крайние секции пакета соединяются плоскими шинами с выводами конденсатора (см. рис. 51, б). Индуктивность шин будет пропорциональна площади сечения $S_{\text{ш}}$ пространства, заключенного между шинами и пакетом секций, и обратно пропорциональна ширине шины $b_{\text{ш}}$:

$$L_{\text{ш}} = \mu_0 S_{\text{ш}} / b_{\text{ш}}. \quad (101)$$

Второй случай (рис. 54, а) характерен для большого количества параллельно соединенных секций, причем все секции присоединяются к шинам на одинаковом расстоянии (по шине) относительно выводов конденсатора. Индуктивность шин определяется по формуле, аналогичной (81),

$$L_{\text{ш}} = \mu_0 d_{\text{ш}} l_{\text{ш}} / b_{\text{ш}}, \quad (102)$$

где $l_{\text{ш}}$ — длина шин; $d_{\text{ш}}$ — расстояние между шинами, определяемое толщиной изоляции.

Суммарная индуктивность конденсатора $L_{\text{к}}$ для обоих вариантов складывается из индуктивности пакета секций $L_{\text{п}}$, главных шин $L_{\text{ш}}$ и выводов $L_{\text{в}}$:

$$L_{\text{к}} = L_{\text{п}} + L_{\text{ш}} + L_{\text{в}}. \quad (103)$$

В обоих вариантах ток по длине шины остается неизменным,

В третьем случае конденсатор состоит из m параллельно соединенных секций, причем секции присоединены равномерно вдоль длины шины, соединяющей их с выводами конденсатора (рис. 54, б). Ток, протекающий по шине, изменяется по ее длине, и конденсатор может быть заменен эквивалентной схемой (рис. 55, а). При равномерном расположении секций вдоль шины можно принять

$$\begin{aligned} L'_1 = L'_2 = \dots = L'_m = L'_m, \\ L_{c1} = L_{c2} = \dots = L_{cm} = L_c, \\ C_1 = C_2 = \dots = C_m = C_c. \end{aligned} \quad (104)$$

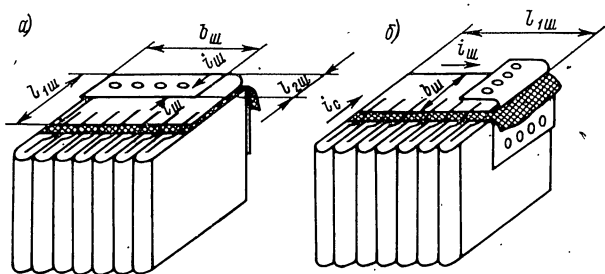


Рис. 54. Эскизы конденсатора при параллельном соединении секций

Рассмотрим разряд конденсаторов на малоиндуктивную нагрузку $L_{\text{н}}$. В этом случае, как показано в [38], ток в нагрузке для схемы рис. 55, а

$$\begin{aligned} i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{U_0 C_c \operatorname{tg}^2 m \alpha_k}{\beta \left(1 + 2n\beta \frac{1 + \operatorname{tg}^2 m \alpha_k}{\beta^2 + \operatorname{tg}^2 m \alpha_k} \right)} \times \\ \times \frac{\sin \frac{t}{\sqrt{C_c \left[L_c + \frac{L'_m}{4\beta^2} (\beta^2 + \operatorname{tg}^2 m \alpha_k) \right]}}}{\sqrt{C_c \left[L_c + \frac{L'_m}{4\beta^2} (\beta^2 + \operatorname{tg}^2 m \alpha_k) \right]}}, \end{aligned} \quad (105)$$

где U_0 — зарядное напряжение конденсатора,

$$\beta = \frac{L'_{\text{ш}}}{2L_{\text{н}}}, \quad (106)$$

α_k — корни уравнения

$$\beta = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} m\alpha, \quad (107)$$

лежащие в интервале $0 < \alpha < \pi$.

Формула (105) показывает, что кривая тока представляет собой сумму m синусоидальных составляющих. При условии $m\beta \ll 1$ ($mL'_{\text{ш}} \ll L_{\text{н}}$) амплитуда пер-

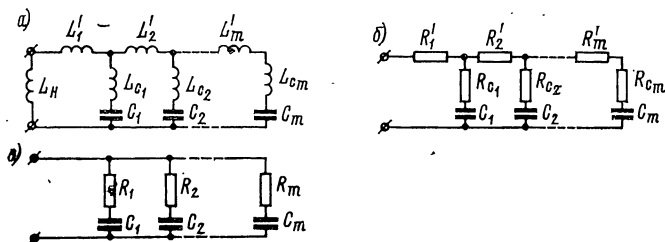


Рис. 55. Эквивалентные схемы замещения для расчета индуктивности (а) и активного сопротивления (б и в) при параллельном соединении секций

вой составляющей тока много больше амплитуд остальных гармоник, частоты которых близки между собой и в несколько раз выше частот первой гармоники. Для амплитуды тока основной частоты имеем

$$I_{\max 1} \approx U_0 : \sqrt{\frac{L_{\text{н}} + \frac{mL'_{\text{ш}}}{3} + \frac{L_{\text{с}}}{m}}{C_{\text{к}}}}, \quad (108)$$

где $C_{\text{к}} = mC_{\text{с}}$ — емкость конденсатора.

Числитель подкоренного выражения представляет собой эквивалентную индуктивность контура в режиме установившихся колебаний

$$L_{\text{экв}}^{(1)} = L_{\text{н}} + \frac{L_{\text{с}}}{m} + \frac{mL'_{\text{ш}}}{3} = L_{\text{н}} + L_{\text{к}}^{(1)}, \quad (109)$$

где

$$L_{\text{к}}^{(1)} = \frac{L_{\text{с}}}{m} + \frac{mL'_{\text{ш}}}{3}; \quad (110)$$

$L_{\kappa}^{(1)}$ — собственная эквивалентная индуктивность конденсатора в режиме установившихся колебаний.

Как следует из (110), второй член в правой части равенства является эквивалентной индуктивностью шин

$$L_{\text{ш}} = \frac{mL'_{\text{ш}}}{3}. \quad (111)$$

Так как по (102)

$$L'_{\text{ш}} = \frac{\mu_0 d_{\text{ш}} l'_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}}, \quad (112)$$

где $l'_{\text{ш}}$ — длина участка шин между соседними секциями, то

$$L_{\text{ш}} = \frac{1}{3} \mu_0 \frac{d_{\text{ш}} l_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} = \mu_0 \frac{d_{\text{ш}} l_{\text{ш. экв}}}{b_{\text{ш}}}, \quad (113)$$

где $l_{\text{ш. экв}} = \frac{1}{3} l_{\text{ш}}$ — эквивалентная длина шины.

Таким образом, в рассматриваемом случае при равномерном присоединении секций вдоль длины шины эквивалентная длина шины равна $1/3$ ее геометрической длины.

Для начальной крутизны тока

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{L_{\text{н}} + \sqrt{L'_{\text{ш}} L_{\text{с}}} \operatorname{cth} m \sqrt{\frac{L'_{\text{ш}}}{L_{\text{с}}}}} = \frac{U_0}{L_{\text{н}} + L_{\kappa}^{(2)}}, \quad (114)$$

$$L_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{L'_{\text{ш}} L_{\text{с}}} \operatorname{cth} m \sqrt{\frac{L'_{\text{ш}}}{L_{\text{с}}}}, \quad (115)$$

где $L_{\kappa}^{(2)}$ — собственная эквивалентная индуктивность конденсатора в начальном режиме, определяющая скорость нарастания тока в начальный момент времени.

Индуктивность $L_{\kappa}^{(2)}$ существенно отличается от индуктивности $L_{\kappa}^{(1)}$, причем обычно $L_{\kappa}^{(2)}$ значительно меньше $L_{\kappa}^{(1)}$ (в первом приближении — на величину индуктивности шин $L_{\text{ш}}$).

Аналогичный результат получается при выводе формулы для эквивалентной индуктивности шин, если

в качестве критерия эквивалентности двух систем принять равенство энергий, запасаемых в индуктивностях. В этом случае по аналогии с (86) $l_{ш. экв} = \frac{1}{3} l_{ш}$ что соответствует формуле (113).

16. Индуктивность конденсаторов с пластинчатыми секциями

Высоковольтный конденсатор с пластинчатыми секциями состоит из ряда последовательно соединенных пакетов, в которых секции включены параллельно и помещены в металлический бак. Обкладки выполняются из алюминиевой фольги.

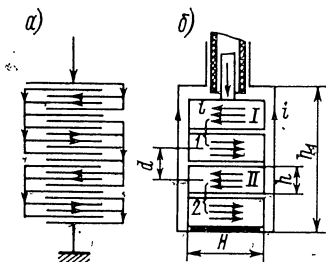


Рис. 56. Конденсатор с пластинчатыми секциями: а — электрическая схема соединений; б — расположение пакетов секций в конденсаторе

Токошем с обкладки осуществляется выводом, ширина которого зависит от назначения конденсатора. У малоиндуктивных конденсаторов ширина вывода почти равна ширине обкладки, а у конденсаторов обычного исполнения — в несколько раз меньше ширины обкладки.

Эскиз пакета секций приведен на рис. 44, б, и схема соединения секций показана на рис. 56, а. Как следует из рисунка, картина протекания токов в конденсаторах с пластинчатым соединением секций приблизительно соответствует аналогичной картине для рулонных секций с фольгой, выступающей по торцам секций

(безындукционная намотка) — как в первом, так и во втором случае ток идет по зигзагообразному пути. Следствием этого при наличии последовательных групп секций в конденсаторах является несколько большая индуктивность конденсаторов с пластинчатыми секциями по сравнению с рулонными секциями, имеющими выводы с одного торца и соединенными по схеме рис. 51, а.

Для расчета собственных и взаимных индуктивностей пакетов воспользуемся методом средних геометрических расстояний [39]. Разобьем все $2n$ пакетов, из которых состоит конденсатор, на пары по два соседних пакета со встречными токами.

Общая индуктивность пакетов L_n складывается из сумм собственных индуктивностей всех пар пакетов L_Σ и суммы взаимных индуктивностей всех пар пакетов между собой M_Σ .

Таким образом, для индуктивности всех пакетов L_n можно записать

$$L_n = L_\Sigma + M_\Sigma, \quad (116)$$

где n — число пар пакетов.

Величину L_{Σ} можно определить как произведение числа пар на индуктивность одной пары L , так как все пакеты одинаковы. Для расчета индуктивности одной пары пакетов воспользуемся методом средних геометрических расстояний. Индуктивность одной пары [37]

$$L = \frac{\mu_0 H}{\pi} \ln \frac{g_{12}}{g_{11}}, \quad (117)$$

где g_{12} — среднее геометрическое расстояние площадей поперечных сечений пакетов 1 и 2 друг от друга; g_{11} — среднее геометрическое расстояние площади поперечного сечения одного пакета самого от себя H — длина пакета (рис. 56, б).

Из рис. 56, б видно, что расстояние между серединами пакетов d равно высоте пакета h , а общая высота всех пакетов h_1 равна $2nh$.

Опустив некоторые промежуточные преобразования, формулу для L_{Σ} можно представить так:

$$L_{\Sigma} = 2\varphi \frac{\mu_0 H}{\pi} \psi \left(1 - \frac{1}{2} \xi \psi + \frac{1}{3} \xi^2 \psi^2 - \frac{1}{4} \xi^3 \psi^3 + \dots \right), \quad (118)$$

где
$$\varphi = \frac{h_1}{b_{\Phi}}; \quad \psi = \frac{1}{\frac{\varphi}{n} + 2}; \quad \xi = \frac{\varphi}{n};$$

b_{Φ} — ширина фольги (см. рис. 44, б).

Исследуя выражение (118) при $n \rightarrow \infty$, можно получить, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_{\Sigma} = \frac{\mu_0 h_1 H}{\pi b_{\Phi}}. \quad (119)$$

Как показывают расчеты, суммарный коэффициент взаимной индукции всех пакетов для большинства наиболее применимых в практике соотношений h_1/b_{Φ} и числа пакетов составляет 20—25% от суммарной индуктивности L_n всех пар пакетов.

Взаимная индуктивность при расчете L_n может быть представлена как удвоенная сумма взаимных индуктивностей пар пакетов между собой:

$$M_{\Sigma} = 2[(n-1)M_{12} + (n-2)M_{13} + \dots + (n-m+1)M_{1m} + \dots + M_{1n}], \quad (120)$$

где m — порядковый номер пары.

Коэффициент взаимной индукции M_{1m} между петлями 1 и m равен

$$M_{1m} = \frac{\mu_0 H}{2\pi} \ln \frac{g_{1,2m} g_{2,(2m-1)}}{g_{1,(2m-1)}^2}, \quad (121)$$

где $g_{1,2m}$ — среднее геометрическое расстояние между площадями поперечного сечения крайних пакетов со встречно направ-

ленными токами; $g_{2, (2m-1)}$ — среднее геометрическое расстояние между площадями поперечного сечения ближних пакетов со встречными токами; $g_{1, (2m-1)}$ — среднее геометрическое расстояние площадей поперечного сечения пакетов с совпадающим направлением токов.

Принимая во внимание (121) — выражение для M_{1m} , получим

$$M_{\Sigma} = -\frac{\mu_0 H}{\pi} \sum_{m=2}^n (n-m+1) \left[\frac{1}{4\chi^2} + \frac{n}{\varphi} \frac{4}{\chi(4\chi^2-1)} \right], \quad (122)$$

где $\chi = \frac{n}{\varphi} + m - 1$.

Специальным исследованием можно показать, что полученный ряд сходится при $n \rightarrow \infty$.

На рис. 57 приведены кривые $L_n = f_1(n)$, $L_{\Sigma} = f_2(n)$ и $M_{\Sigma} = f_3(n)$ для $\varphi = 2$ при длине пакета в направлении тока 1 м.

Этими кривыми можно пользоваться для определения индуктивности пакетов секций высоковольтных конденсаторов при любых длинах пакетов, умножив найденное на кривой значение на их длину, выраженную в метрах.

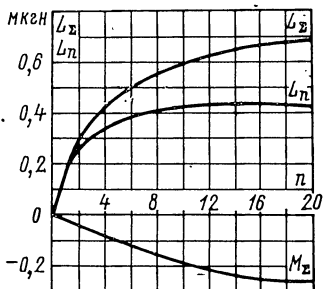


Рис. 57. Зависимость L_{Σ} , M_{Σ} , L_n от числа пар пакетов n в конденсаторе при длине пакета в направлении тока, равной 1 м,

$$\varphi = \frac{l_1}{\theta \varphi} = 2$$

Индуктивность соединительных шин относительно корпуса конденсатора может быть легко вычислена по формуле (102), в которой $d_{ш}$ соответствует расстоянию между шиной и корпусом конденсатора.

17. Оптимальные параметры конденсатора по резонансной частоте

В ряде случаев бывает необходимо создание конденсаторов с предельно высокой собственной резонансной частотой $f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_k C_k}}$. Весьма важным яв-

ляется также и требование минимального волнового сопротивления конденсаторов $\rho_k = \sqrt{L_k / C_k}$, так как при этом можно получить максимальный ток при работе на малые нагрузки.

Рассмотрим зависимость резонансной частоты и волнового сопротивления от размеров конденсатора.

Индуктивность рулонных секций конденсатора может быть оценена по формуле $L_c = \frac{\mu_0 l_{\text{экв}} d_c}{b}$, где $l_{\text{экв}}$ — эквивалентная длина обкладок, равная приблизительно $l/3$.

Таким образом,

$$L_c = \frac{\mu_0 l d_c}{3b} = \frac{\mu_0 S}{3b}, \quad (123)$$

т. е. в этом случае индуктивность определяется площадью $S = l d_c$, через которую проходит магнитный поток, определяющий индуктивность секции.

Для секции, имеющей одну пару выводов, расположенную в начале обкладки, площадь S может быть представлена в виде:

$$S = l d_c = k_c H d_c \approx H h, \quad (124)$$

где $H \approx \pi D_{\text{ср}}/2$ — средняя длина слоя в секции; k_c — число слоев толщиной d_c в секции; $h \approx k_c d_c$ — общая толщина секции (см. рис. 44, а).

Следовательно, если габариты секции равны соответственно b , H и h , то индуктивность такой секции приблизительно может быть оценена по формуле

$$L_c = \frac{\mu_0 h H}{3b}. \quad (125)$$

Например, для секции импульсных конденсаторов на напряжение 3 кВ, емкостью 1,0 мкФ, имеющей габариты $h=1$ см, $H=10$ см, $b=30$ см, с одной парой выводов, расположенной в начале обкладки,

$$L_c = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 0,3} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ гн.}$$

Сравнение формулы (125) для рулонных секций и формулы (119) для пластинчатых секций показывает их полную идентичность, в обоих случаях индуктивность определяется основными размерами пространства, занятого диэлектриками (h , H и b).

При увеличении числа пар выводов в секции и расположении их согласно рис. 49, б, индуктивность

рулонной секции падает обратно пропорционально квадрату этого числа.

При рациональном способе соединения секций индуктивность конденсатора L_k , собранного из рулонных секций, увеличивается в первом приближении прямо пропорционально числу секций, соединенных последовательно n_c , и обратно пропорционально числу параллельно соединенных секций m_c :

$$L_k = L_c \frac{n_c}{m_c}. \quad (126)$$

Полная энергия секции конденсатора с размерами h , H и b может быть определена из соотношения

$$W_c = W_{\text{уд}} V_c = \frac{\epsilon E_p^2}{2} h H b = \frac{C_c U_c^2}{2}, \quad (127)$$

где $V_c = h H b$ — объем секции конденсатора.

Учитывая (125) и (127), резонансная частота секции $f_{p.c}$ может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} f_{p.c} &= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_c C_c}} = \frac{U_c}{2\pi \sqrt{\frac{\mu_0 h H}{3b} \frac{\epsilon E_p^2 h H b}{U_c^2}}} = \\ &= \frac{U_c}{3,6 h H E_p \sqrt{\mu_0 \epsilon}}. \end{aligned} \quad (128)$$

Например, для секции с одной парой выводов в начале обкладок на напряжение 3 кВ, 1,0 мкФ, имеющей $E_p = 50$ кВ/мм, $f_{p.c} = 2,5 \cdot 10^8$ Гц.

Для конденсаторов, собранных из рулонных секций, индуктивность конденсатора может быть определена по (126).

Учитывая, что емкость конденсатора

$$C_k = C_c m_c / n_c, \quad (129)$$

можно заключить, что в этом случае резонансная частота конденсатора $f_{p.k}$ равна резонансной частоте секции $f_{p.c}$ и не зависит от размеров конденсатора. Основная трудность заключается в рациональной конструкции соединений секции и вывода конденсатора.

Используя равенства (125) и (127), определим волновое сопротивление секций

$$\rho_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} = \sqrt{\frac{\mu_0 h H}{3b} \frac{U_c^2}{\varepsilon E_p^2 h H b}} = 0,58 \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \frac{U_c}{E_p b}. \quad (130)$$

На основании (126) и (129) волновое сопротивление конденсатора

$$\rho_k = \rho_c \frac{n_c}{m_c}. \quad (131)$$

Аналогичные по структуре формулы получаются и для расчета резонансной частоты и волнового сопротивления конденсатора из пластинчатых секций.

Таким образом, увеличение резонансной частоты возможно за счет сокращения размеров h и H , причем увеличение емкости целесообразно производить за счет увеличения размера b , не влияющего на резонансную частоту конденсатора. При этом также будет иметь место снижение волнового сопротивления конденсатора.

Глава 5

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

18. Потери энергии в импульсных конденсаторах

При работе импульсного конденсатора в режиме колебательного разряда на малую индуктивность возможны два варианта: 1) потери энергии в контуре пренебрежимо малы по сравнению с потерями в конденсаторе; 2) потери энергии в контуре соизмеримы с потерями в конденсаторе.

В первом варианте вся энергия конденсатора выделяется в самом конденсаторе. При этом мощность,

выделяемая в конденсаторе, может быть определена как

$$P_k = W_k z_1 = \frac{C_k U_p^2}{2} z_1, \quad (132)$$

где z_1 — число разрядов конденсатора в единицу времени.

Потери в конденсаторе определяются эквивалентным активным сопротивлением конденсатора

$$R_k = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}}}{\omega C_k} = \frac{1}{Q_k \omega C_k}, \quad (133)$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}}$ — эквивалентный $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, связанный с добротностью конденсатора соотношением $\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}} = 1/Q_k$.

При отсутствии потерь во внешнем контуре декремент колебаний напряжения Δ_k при разряде конденсатора определяется только потерями в конденсаторе и может быть вычислен из выражения

$$\ln \Delta_k = \frac{R_k}{2L_0} T = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}}}{2\omega L_0 C_k} T, \quad (134)$$

где L_0 — суммарная индуктивность контура.

Учитывая, что

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L_0 C_k}} = 2\pi \frac{1}{T}, \quad (135)$$

имеем

$$\ln \Delta_k = \pi \operatorname{tg} \delta_{\text{экв}} \quad (136)$$

или

$$\ln \Delta_k = \pi/Q_k, \quad (137)$$

где $Q_k = \frac{1}{R_k \omega C_k}$ — добротность контура, определяемая только потерями в конденсаторе.

На основании (137)

$$R_k = \frac{\ln \Delta_k}{\pi \omega C_k}. \quad (138)$$

Во втором варианте доля энергии, выделяемая в конденсаторе, зависит от соотношения между эквивалентными сопротивлениями контура R_0 и конденсатора R_k . Обычно непосредственное определение активного сопротивления всего контура R_0 , включая раз-

рядное устройство, вызывает существенные затруднения. В этом случае при колебательном разряде конденсатора оно может быть оценено по величине добротности контура Q_0 или декремента колебаний Δ_0 :

$$R_0 = \frac{1}{Q_0 \omega C_K} = \frac{\ln \Delta_0}{\pi \omega C_K}. \quad (139)$$

На основании (133) и (139) можно определить потери в конденсаторе:

$$P_K = \frac{C_K U_p^2}{2} z_1 \frac{R_K}{R_0} = W_{KZ1} \frac{\ln \Delta_K}{\ln \Delta_0}. \quad (140)$$

Учитывая (133) и (139), получим

$$P_K = \frac{C_K U_p^2}{2} z_1 Q_0 \operatorname{tg} \delta_{\text{эКВ}}. \quad (141)$$

Определим эквивалентное по тепловому режиму время воздействия напряжения частотой $f = \omega / (2\pi)$ при замене затухающей косинусоиды на незатухающие синусоидальные колебания.

Энергия, выделяемая в конденсаторе при воздействии затухающих косинусоидальных колебаний, может быть определена по формуле:

$$W_{B.K1} = \int_0^{\infty} u^2 g dt = \int_0^{\infty} [U_m \cos \omega t e^{-\delta t}]^2 g dt, \quad (142)$$

где $g = \omega C_K \operatorname{tg} \delta_{\text{эКВ}}$ — эквивалентная активная проводимость конденсатора, и $\delta = R_0 / (2L_0)$.

Энергия, выделяемая в конденсаторе за время $\tau_{\text{эКВ}}$ при воздействии синусоидального напряжения (при целом числе полупериодов),

$$W_{B.K.\text{эКВ}} = \int_0^{\tau_{\text{эКВ}}} U_m^2 g \cos^2 \omega t dt = \frac{U_m^2}{2} g \tau_{\text{эКВ}}. \quad (143)$$

Приравнявая $W_{B.K1} = W_{B.K.\text{эКВ}}$, имеем

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{\text{эКВ}}}{2} = \int_0^{\infty} (\cos \omega t e^{-\delta t})^2 dt &= \frac{e^{-2\delta t}}{4} \left[-\frac{1}{\delta} + \right. \\ &\left. + \frac{1}{\sqrt{\delta^2 + \omega^2}} \cos \left(2\omega t + \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\delta} \right) \right] \Big|_0^{\infty} \approx \frac{1}{4\delta} \end{aligned} \quad (144)$$

при $\omega \gg \delta$.

Таким образом,

$$\tau_{\text{экв}} = \frac{1}{2\delta}, \quad (145)$$

т. е. эквивалентное время воздействия незатухающих колебаний равно половине постоянной времени экспоненты затухающих колебаний. При этом мощность, выделенная в конденсаторе, определится как

$$P_{\kappa} = \frac{U_m^2}{2} g \tau_{\text{экв}} z_1 = \frac{U_m^2 g}{4\delta} z_1. \quad (146)$$

Если потери во внешнем контуре пренебрежимо малы, то $\delta = R_{\kappa} / (2L_0)$.

Учитывая, что $g = \omega C_{\kappa} \operatorname{tg} \delta_{\text{экв}} = R_{\kappa} \omega^2 C_{\kappa}^2$, имеем

$$P_{\kappa} = \frac{U_m^2 2L_0 \omega^2 C_{\kappa}^2}{4} z_1 = \frac{U_m^2 C_{\kappa}}{2} z_1, \quad (147)$$

т. е. выражение, аналогичное формуле (132).

Определение потерь в диэлектрике конденсатора при аperiodических импульсах можно производить согласно одному из методов, основываясь на замене отдельных участков импульса «отрезками» синусоидального напряжения [40]. Нарастающий и спадающий участки импульса заменяются синусоидальным напряжением с периодом, в четыре раза превышающим длительность нарастания или спада, и с максимальной амплитудой, равной максимальному значению импульса. Плоский участок на вершине импульса заменяется постоянным напряжением, по величине равным максимальному значению импульса, и не влияющим на величину потерь в диэлектрике конденсатора. Потери в этом случае могут быть определены из соотношения:

$$\begin{aligned} P_{\kappa} &= \frac{U_m^2}{2} C_{\kappa} z_1 (\omega_{\phi} \tau_{\phi} \operatorname{tg} \delta_{\phi} + \omega_c \tau_c \operatorname{tg} \delta_c) = \\ &= \frac{\pi U_m^2}{4} C_{\kappa} z_1 (\operatorname{tg} \delta_{\phi} + \operatorname{tg} \delta_c), \end{aligned} \quad (148)$$

где $\omega_{\phi} = \frac{2\pi}{4\tau_{\phi}}$ — угловая частота, соответствующая фронту импульса с длительностью τ_{ϕ} ; $\omega_c = \frac{2\pi}{4\tau_c}$ — угловая частота, соответствующая спаду импульса с дли-

тельностью τ_c ; $\operatorname{tg} \delta_\phi$ и $\operatorname{tg} \delta_c$ — тангенс угла диэлектрических потерь при частотах $f_\phi = \frac{\omega_\phi}{2\pi}$ и $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$; z_1 — число разрядов конденсатора в секунду.

Если $\tau_\phi \approx \tau_c$, то

$$P_d = U_m^2 C_k z_1 \omega_\phi \tau_\phi \operatorname{tg} \delta_\phi = \frac{\pi U_m^2}{2} C_k z_1 \operatorname{tg} \delta_\phi. \quad (149)$$

Формула (149) может быть также представлена в виде:

$$P_d = \frac{U_m^2}{2} \omega_\phi C_k \operatorname{tg} \delta_\phi \frac{1}{G}, \quad (150)$$

где G — скважность импульсов.

Потери в диэлектрике конденсатора при различных частотах рассмотрены в гл. 1.

Второй способ основан на применении принципа наложения [41, 42]. Несинусоидальное напряжение, воздействующее на конденсатор, представляется при помощи ряда Фурье в виде суммы гармонических составляющих. При этом предполагается, что постоянная составляющая разложения в ряд Фурье не участвует в создании потерь.

В этом случае потери в диэлектрике конденсатора

$$P_d = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2} U_{mi}^2 \omega_i C_{k||i} \operatorname{tg} \delta_i, \quad (151)$$

где $C_{k||i}$ — емкость, измеренная на i -й гармонике с частотой ω_i по параллельной схеме замещения; U_{mi} и $\operatorname{tg} \delta_i$ — соответственно амплитуда напряжения и $\operatorname{tg} \delta$ на i -й гармонике.

В тех случаях, когда несинусоидальная форма напряжения представляет собой последовательное чередование зарядов и разрядов конденсатора, длительность которых одного порядка, ряд Фурье будет быстросходящимся, и суммирование потерь от всех имеющих практическое значение гармонических составляющих не вызывает затруднений.

При формировании мощных импульсов используется возможность накопления энергии конденсатором от источника малой мощности за длительный промежуток времени и отдача запасенной энергии

в течение малого промежутка времени. В этом случае последовательность импульсов состоит из длительных зарядов и кратковременных разрядов конденсатора; коэффициенты ряда Фурье имеют плохую сходимость. Более простое решение может быть получено, если последовательность импульсов представить в виде двух самостоятельных последовательностей, составленных из одинаковых по длительности процессов. При этом

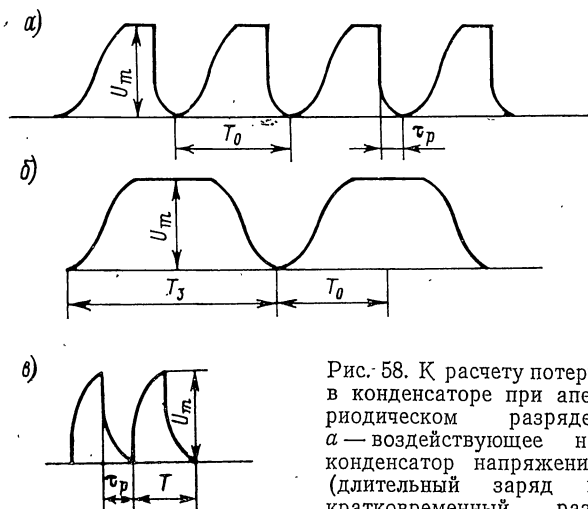


Рис. 58. К расчету потерь в конденсаторе при аперриодическом разряде: а — воздействующее на конденсатор напряжение (длительный заряд и кратковременный разряд); б — последовательность длительных заряд—зарядов; в — последовательность кратковременных заряд — разрядов

предполагается, что потери в диэлектрике от воздействия одиночного заряда равноценны потерям от действия одиночного разряда конденсатора такой же амплитуды, формы и длительности, как и заряд рис. 58.

Потери в диэлектрике конденсатора от каждой последовательности подсчитываются по формуле:

$$P_d = \sum_{i=1}^{\infty} P_i = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{U_{mi}^2}{2} C_{к\parallel i} \omega_i \operatorname{tg} \delta_i \frac{\tau_p}{T_0}, \quad (152)$$

где τ_p — длительность разряда (заряда); T_0 — интервал времени между импульсами.

При определении потерь в диэлектрике конденсатора под воздействием несинусоидального напряжения при достаточно больших скоростях нарастания напряжения на конденсаторе возможны значительные ошибки [43]. Это связано с тем, что при больших эквивалентных частотах и при больших значениях $\operatorname{tg} \delta_i$ следует учитывать зависимость эквивалентной емкости конденсатора от величины $\operatorname{tg} \delta$. При больших значениях $\operatorname{tg} \delta_i$ величина $C_{\kappa \parallel i}$, измеренная по параллельной схеме замещения, будет существенно отличаться от величины емкости при последовательной схеме замещения. Переход от простейшей последовательной схемы замещения (емкость C_s , сопротивление r_s) к простейшей параллельной схеме замещения (емкость $C_{\parallel}$, сопротивление $r_{\parallel}$) приводит к соотношению между емкостями:

$$C_{\parallel i} = \frac{C_{si}}{1 + \operatorname{tg} \delta_i}, \quad (153)$$

что при больших значениях $\operatorname{tg} \delta$ дает значительную разницу между $C_{\parallel}$ и C_s .

В ряде случаев целесообразно переходить на более сложные эквивалентные схемы замещения.

Формулы для расчета потерь в диэлектрике конденсатора при некоторых формах импульсного напряжения получены в [44]. Для пилообразных импульсов (рис. 59, а)

$$P_{\kappa} = \frac{U_m^2 \omega C_{\kappa} \operatorname{tg} \delta}{8} \frac{0,049 \tau_{\kappa}}{\tau_c}, \quad (154)$$

где $\omega = 2\pi/\tau_{\kappa}$, а значения τ_{κ} и τ_c соответствуют обозначениям рис. 59, а.

Для трапецидальных импульсов (рис. 59, б) $\omega = 2\pi/T_{\kappa}$,

$$P_{\kappa} = \frac{U_m^2 \omega C_{\kappa} \operatorname{tg} \delta}{8 \tau_{\kappa}^2} \frac{0,78 T_{\kappa}^2}{\left(1 - \frac{\tau_{\kappa} - \tau_{\phi} - \tau_c}{\tau_{\kappa}}\right)^2}. \quad (155)$$

Для треугольных импульсов (рис. 59, в) $\omega = 2\pi/T_H$

$$P_d = \frac{U_m^2 \omega C_K \operatorname{tg} \delta}{8\tau_H^2} \cdot 0,78 T_H^2. \quad (156)$$

Для импульсов с высокочастотным заполнением (рис. 59, г)

$$P_d = \frac{U_m^2 \omega_0 C_K \operatorname{tg} \delta}{2} \left[\frac{\tau_H^2}{4T_H^2} \left(1 + \frac{\tau_H - \tau_\Phi - \tau_c}{\tau_H} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{0,18 T_H^2}{\tau_H^2 \left(1 - \frac{\tau_H - \tau_\Phi - \tau_c}{\tau_H} \right)^2} \right]. \quad (157)$$

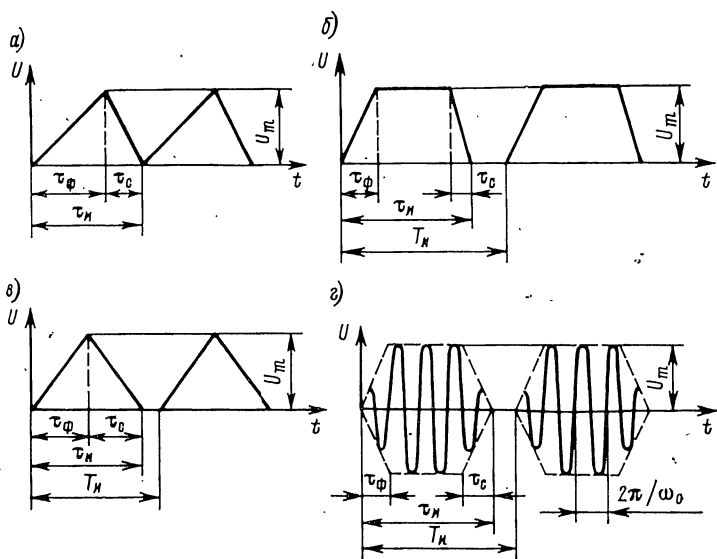


Рис. 59. К расчету потерь при различных формах импульсного напряжения

Формулы получены в предположении, что угол потерь не зависит от частоты в тех пределах, которые соответствуют высшим гармоникам, учитываемым при расчете.

Значения $\lg \delta$ в этих формулах следует принимать для частоты, соответствующей частоте следования импульсов. Формулы дают предельное значение мощности, рассеиваемой при данной форме импульсов. Практически наблюдаемые значения будут несколько ниже.

В установках для создания больших импульсов токов токи, протекающие в цепи разряда конденсатора, весьма велики. Поэтому потери в обкладках конденсаторов соизмеримы, а в ряде случаев и значительно превосходят потери в диэлектрике конденсатора.

При определении активного сопротивления фольги и контактных соединений необходимо учитывать неравномерность распределения тока по сечениям токоведущих элементов вследствие поверхностного эффекта.

Для алюминия эквивалентная глубина проникновения может быть подсчитана по формуле [45]:

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2,7/\sqrt{f}, \text{ мм} \quad (158)$$

и для меди

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2,1/\sqrt{f}, \text{ мм}, \quad (159)$$

где f — частота в кГц . При $f = 3 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ для алюминия $d_{\text{ЭКВ}} = 0,049 \text{ мм}$ и для меди $d_{\text{ЭКВ}} = 0,038 \text{ мм}$.

Так как толщина медной и алюминиевой фольги, употребляемой при изготовлении секций, лежит в пределах $0,01\text{—}0,04 \text{ мм}$, то явлением поверхностного эффекта при определении активного сопротивления фольги можно пренебречь; поверхностный эффект должен быть учтен при расчете активного сопротивления соединительных шин и выводов конденсатора.

Оценим эквивалентное активное сопротивление алюминиевой фольги обкладок секций. При вычислении этого сопротивления необходимо принять во внимание изменение тока по длине обкладки [1].

Рассмотрим конденсаторную секцию с выводами в конце каждой обкладки с длиной обкладки l , шириной $b_{\text{ф}}$, толщиной $d_{\text{ф}}$ (при $d_{\text{ф}} < d_{\text{ЭКВ}}$) при удельном сопротивлении металла обкладки $\rho_{\text{м}}$.

В конце обкладок, где поставлен вывод, ток равен $I_{\text{с}}$; далее ток линейно спадает по длине обкладки и в противоположном конце обкладки равен нулю.

На расстоянии x от начала обкладки ток будет определяться выражением (82) и потери на нагрев элемента обкладки длиной dx будут:

$$dP_{\phi} = \frac{I_c^2 \rho_M}{l^2 b_{\phi} d_{\phi}} (l-x)^2 dx. \quad (160)$$

Потери, расходуемые в двух обкладках,

$$P_{\phi} = 2 \int_0^l \frac{I_c^2 \rho_M}{l^2 b_{\phi} d_{\phi}} (l-x)^2 dx = \frac{2}{3} I_c^2 \frac{l \rho_M}{b_{\phi} d_{\phi}}. \quad (161)$$

Таким образом, эквивалентное активное сопротивление обкладок секции

$$R_{\phi} = \frac{2}{3} \frac{\rho_M l}{b_{\phi} d_{\phi}}. \quad (162)$$

Уменьшение потерь в обкладках возможно следующими способами: 1) увеличением толщины фольги; 2) увеличением числа выводов в секции.

Увеличение толщины фольги целесообразно лишь в пределах эквивалентной глубины проникновения, что соответствует примерно 0,05 мм для алюминия. Однако намотка секций с фольгой, имеющей толщину более 0,03 мм, является технологически затруднительной и нежелательной.

Наиболее перспективным является увеличение числа выводов в секции. Ряд авторов [42] указывает на эту возможность, не вызывающую как будто бы больших трудностей, причем увеличение числа выводов в N раз приводит к уменьшению активного сопротивления фольги в N^2 раз. Более глубокое рассмотрение этого вопроса показывает, что увеличение числа выводов секции в ряде случаев не приводит к желаемому результату.

Действительно, выше было установлено, что увеличение числа выводов в секции с широкой фольгой практически не приводит к уменьшению ее индуктивности вследствие шунтирования выводов, удаленных от начала намотки, основными обкладками и вытеснения тока на первую пару выводов, расположенную в начале фольги.

Аналогичная картина наблюдается и при рассмотрении активного сопротивления секции. Коль скоро большая часть тока протекает через одну пару выводов, то остальные не приводят к сколько-нибудь заметному изменению активного сопротивления.

Уменьшения эквивалентного активного сопротивления фольги, аналогичного уменьшению индуктивности секции, можно достичь, увеличивая число выводов в секции и обеспечивая принудительное равномерное токораспределение между ними (см. § 15, в).

Формулы эквивалентного сопротивления обкладок секции для различных схем соединения обкладок конденсатора приведены на рис. 60 [42]. Формулы составлены в предположении равномерного распределения тока между параллельно соединенными выводами.

Эквивалентное активное сопротивление секции $R_c = R_\phi + R_d$, где $R_d = P_d / (U_k^2 \omega^2 C_k^2)$ — сопротивление, эквивалентирующее потери в диэлектрике секции.

Суммарное активное сопротивление всех металлических токоведущих частей конденсатора будет зависеть от схемы соединения пакета секций и шин.

Для конденсаторов, выполненных в соответствии со схемами рис. 51 и 54, а, суммарное активное сопротивление конденсатора будет определяться последовательно включенными сопротивлениями пакета секций R_Π , главных шин R_Π и выводов R_v :

$$R_k = R_\Pi + R_\Pi + R_v = R_c \frac{n_c}{m_c} + R_\Pi + R_v. \quad (163)$$

В случае конденсаторов, выполненных по рис. 54, б, активное сопротивление секций и главных шин можно определить как для цепной схемы рис. 55, б.

Если распределение тока по m параллельно соединенным секциям конденсаторов задается емкостным сопротивлением секции, то можно считать токи в каждой из секций одинаковыми.

В этом случае ток, протекающий по сопротивлению R_1' , будет равен mI_0 , по сопротивлению R_2' — соответственно $(m-1)I_0$, по сопротивлению R_3' — $(m-2)I_0$ и т. д., где I_0 — ток в каждой из секций.

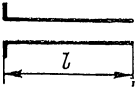
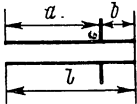
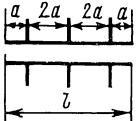
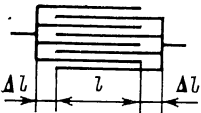
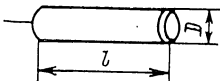
Схема соединения обкладок конденсатора	Формула эквивалентного сопротивления обкладок конденсатора
	$R_{\phi} = \frac{2}{3} \rho_m \frac{l}{S}$
	$R_{\phi} = \frac{2}{3} \rho_m \frac{l}{S} \frac{a^3 + b^3}{(a + b)^3}$
	$R_{\phi} = \frac{2}{3} \rho_m \frac{l}{S} \left(\frac{1}{2N} \right)^2,$ N — количество пар выводов
	$R_{\phi} = \frac{2}{3} \rho_m \frac{(l + 3\Delta l)(2N - 3)}{S(N - 1)^2},$ N — число пластин
	$R_{\phi} = \frac{2}{3} \rho_m \frac{l}{\pi d D}$ d — толщина, D — средний диаметр

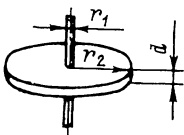
Схема соединения обкладок конденсатора	Формула эквивалентного сопротивления обкладок конденсатора
	$R_{\Phi} = \frac{\rho_M}{2\pi d} \left[\left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1^2 - 3r_2^2}{4(r_2^2 - r_1^2)^2} \right]$

Рис. 60. Эквивалентное сопротивление обкладок конденсатора при различных схемах соединения

Примем

$$\begin{aligned} R'_1 &= R'_2 = \dots = R'_m = R'_{\text{ш}}; \\ R_{c1} &= R_{c2} = \dots = R_{cm} = R_c; \\ C_1 &= C_2 = \dots = C_m = C_c, \end{aligned} \quad (164)$$

где $R'_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}/m$ — активное сопротивление участка шин между соседними секциями; R_c — активное сопротивление секций.

При этом схема рис. 55, б может быть преобразована в схему рис. 55, а, в которой все ветви соединены параллельно и для которой

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= mR'_{\text{ш}} + R_c, \\ R_2 &= [m + (m-1)]R'_{\text{ш}} + R_c, \\ &\dots \dots \dots \\ R_k &= [m + (m-1) + (m-2) + \dots + \\ &+ (m-k+1)]R'_{\text{ш}} + R_c, \\ R_m &= [m + (m-1) + (m-2) + \dots + 1]R'_{\text{ш}} + R_c. \end{aligned} \right\} \quad (165)$$

Полное сопротивление k -й ветви равно

$$Z_k = R_k - j \frac{1}{\omega C_c}, \quad (166)$$

где ω — угловая частота колебаний в разрядном режиме, а проводимость k -й ветви

$$Y_k = \frac{\omega C_c (j + \omega R_k C_c)}{1 + \omega^2 R_k^2 C_c^2}. \quad (167)$$

Так как $\omega^2 R_k^2 C_c^2 \ll 1$, то

$$Y_k \approx \omega^2 R_k C_c^2 + j\omega C_c. \quad (168)$$

Эквивалентная суммарная проводимость всего пакета секций будет

$$Y_{\Pi} = \sum_{k=1}^m Y_k = \sum_{k=1}^m \omega^2 R_k C_c^2 + j\omega m C_c. \quad (169)$$

При этом эквивалентная емкость конденсатора

$$C_{\text{экв}} = m C_c, \quad (170)$$

а эквивалентная активная проводимость пакета секций

$$g_{\Pi} = \sum_{k=1}^m \omega^2 R_k C_c^2 = \omega^2 C_c^2 \left[R_{\text{ш}} \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{k-1} (m-i) + m R_c \right]. \quad (171)$$

Можно показать, что

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{k-1} (m-i) = \sum_{k=1}^m k^2. \quad (172)$$

Подставляя (172) в (171), имеем

$$g_{\Pi} = \omega^2 C_c^2 \left[R_{\text{ш}} \sum_{k=1}^m k^2 + m R_c \right]. \quad (173)$$

При переходе к схеме замещения пакета секций с последовательным соединением $C_{\text{экв}}$ и R_{Π} эквивалентное активное сопротивление пакета секций

$$R_{\Pi} = \frac{g_{\Pi}}{\omega^2 C_{\text{экв}}}. \quad (174)$$

Подставляя в (174) (173) и (170), имеем

$$R_{\Pi} = R_{\text{ш}} \frac{\sum_{k=1}^m k^2}{m^2} + \frac{R_c}{m}. \quad (175)$$

Учитывая, что $R'_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}/m$, получаем

$$R_{\text{п}} = R'_{\text{ш}} \frac{\sum_{k=1}^m k^2}{m^3} + \frac{R_{\text{с}}}{m}. \quad (176)$$

$$\text{При } m \rightarrow \infty \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^m k^2}{m} = \frac{1}{3}. \quad (177)$$

Таким образом, эквивалентное активное сопротивление шин

$$R_{\text{экв. ш}} = \frac{1}{3} R_{\text{ш}}. \quad (178)$$

Полное активное сопротивление конденсатора

$$R_{\text{к}} = R_{\text{п}} + R_{\text{в}} = \frac{1}{3} R_{\text{ш}} + \frac{R_{\text{с}}}{m} + R_{\text{в}}, \quad (179)$$

где $R_{\text{в}}$ — активное сопротивление выводов конденсатора.

Зная эквивалентное активное сопротивление, мощность, расходуемая в этом сопротивлении, может быть определена следующим образом.

При колебательном слабозатухающем разряде с током $i_{\text{к}}(t)$ воздействие одного импульса может быть эквивалентировано воздействию синусоидального тока той же амплитуды, но с эквивалентным временем $\tau_{\text{экв}}$. При этом мощность, выделяемая в конденсаторе,

$$P_{\text{к}} = z_1 \int_0^{\infty} i_{\text{к}}^2 R_{\text{к}} dt = z_1 \frac{I_m^2}{2} R_{\text{к}} \tau_{\text{экв}}, \quad (180)$$

где I_m — амплитуда разрядного тока; $\tau_{\text{экв}}$ — эквивалентная длительность синусоидального тока с амплитудой I_m ; z_1 — количество импульсов в секунду.

При апериодическом разряде воздействие одного импульса тока может быть эквивалентировано воздействию постоянного тока той же амплитуды, но с эквивалентным временем $\tau_{\text{экв}}$. При этом мощность, выделяемая в конденсаторе,

$$P_{\text{к}} = z_1 \int_0^{\infty} i_{\text{к}}^2 R_{\text{к}} dt = z_1 I_m^2 R_{\text{к}} \tau_{\text{экв}}. \quad (181)$$

Рассмотрим определение $\tau_{\text{эКВ}}$ для колебательного режима разряда. В этом случае

$$i_K = I_m \cos \omega t e^{-\delta t}, \quad (182)$$

где $\delta = \frac{R_0}{2L_0}$ — затухание контура.

Тогда по аналогии с (144) при $\omega \gg \delta$

$$\tau_{\text{эКВ}} = 2 \int_0^{\infty} (\cos \omega t e^{-\delta t})^2 dt \approx \frac{1}{2\delta}. \quad (183)$$

Рассмотрим определение $\tau_{\text{эКВ}}$ для аperiodического режима разряда. В этом случае ток в конденсаторе изменяется по закону

$$i_K = I_m e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (184)$$

где $\tau = R_0 C_K$ — постоянная времени разряда конденсатора; $I = U_0/R_0$ — амплитуда разрядного тока.

Мощность, выделяемая в сопротивлении R_K ,

$$P_K = z_1 \int_0^{\infty} i_K^2 R_K dt = z_1 I_m^2 R_K \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt. \quad (185)$$

Приравнивая правые части (181) и (185), имеем

$$\tau_{\text{эКВ}} = \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = \frac{\tau}{2}. \quad (186)$$

Рассмотрим определение $\tau_{\text{эКВ}}$ для критического аperiodического разряда.

В этом случае ток в конденсаторе изменяется по закону:

$$i_K = \frac{U_0}{L_0} t e^{-\frac{R_0}{2L_0} t} = \frac{U_0}{L_0} t e^{-\delta t}, \quad (187)$$

причем

$$R_0 = 2 \sqrt{\frac{L_0}{C_K}}.$$

Максимальное значение тока I_m будет при

$$t_m = \frac{1}{\delta} = \frac{2L_0}{R_0} = \frac{2L_0}{R_0} = \sqrt{L_0 C_K}. \quad (188)$$

При этом

$$I_m = \frac{U_0}{\delta L_0 e} = \frac{2U_0}{R_0 e}. \quad (189)$$

С учетом (189)

$$i_K = I_m \delta t e^{-\delta t}. \quad (190)$$

Мощность, выделяемая в R_k ,

$$P_k = z_1 \int_0^{\infty} i_k^2 R_k dt = z_1 \int_0^{\infty} \left(\frac{U_0}{L_0} t \right)^2 e^{-2\delta t} R_k dt = \\ = z_1 I_m^2 R_k \delta^2 e^2 \int_0^{\infty} t^2 e^{-2\delta t} dt. \quad (191)$$

Приравнявая правые части (181) и (191), имеем

$$\tau_{экв} = \delta^2 e^2 \int_0^{\infty} t^2 e^{-2\delta t} dt = \frac{e^2}{4} \sqrt{L_0 C_k} = 1,86 \sqrt{L_0 C_k} = \frac{1,86}{\delta}. \quad (192)$$

При определении потерь в обкладках конденсаторов в случае колебательного разряда с частотой колебаний, близкой к резонансной частоте секции, необходимо учитывать, что в этом случае изменение тока по длине обкладок отличается от линейного и не соответствует формуле (82).

Как показано в [46], в этом случае распределение токов по длине секции должно производиться с учетом индуктивности обкладок. Тогда потери в обкладках секции при незатухающем синусоидальном напряжении, изменяющемся с частотой ω ,

$$P'_\phi = \rho_m \frac{l}{b_\phi d_\phi} \frac{U_c^2 C_c^2 \omega_c^2}{\cos^2 \alpha} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha} \right), \quad (193)$$

где U_c — действующее значение напряжения секции; C_c — емкость секции; $\alpha = \omega/\omega_c$; $\omega_c = \frac{1}{l \sqrt{L_{об.уд} C_{об.уд}}}$; $L_{об.уд}$ — индук-

тивность обкладок на единицу длины; $C_{об.уд}$ — емкость обкладок на единицу длины.

Потери за один i -й полупериод колебательного разряда с частотой $f = \omega/(2\pi)$ будет $W_{\phi i} = P'_\phi / (2f)$.

Потери за n полупериодов колебательного разряда

$$W_\phi = \sum_{i=1}^n W_{\phi i} = \rho_m \frac{l}{b_\phi d_\phi} \frac{2\alpha^2}{\omega \cos^2 \alpha} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha} \right) \sum_{i=1}^n I_{mi}^2, \quad (194)$$

где I_{mi} — амплитуда тока в секции в i -м полупериоде.

Как было показано в [47], для колебательного разряда

$$\sum_{i=1}^n I_{mi}^2 = \frac{1}{2} U_{cm}^2 C_c^2 f^2 \frac{(\Delta^n - 1)(4\pi^2 + \ln^2 \Delta)}{\Delta^n \ln \Delta}, \quad (195)$$

где $\ln \Delta = \pi \frac{R_0}{L_0 \omega}$; R_0 — сопротивление в контуре разряда; L_0 — индуктивность в контуре разряда; $U_{cm} = \sqrt{2} U_c$.

На основании (194) и (195) потери в обкладках за один колебательный импульс:

$$W_{\phi} = \rho_m \frac{l}{b_{\phi} d_{\phi}} U_{cm}^2 C_c^2 \frac{\alpha^2 \omega}{4\pi^2 \cos^2 \alpha} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right) \times \frac{(\Delta^n - 1)(4\pi^2 + \ln^2 \Delta)}{\Delta^n \ln \Delta}. \quad (196)$$

Относительные потери в обкладках

$$\eta = \frac{W_{\phi}}{C_c U_{cm}^2 / 2} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{R_{об. уд} l}{z_c} \frac{\alpha^3}{\cos^2 \alpha} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right) \times \frac{(\Delta^n - 1)(4\pi^2 + \ln^2 \Delta)}{\Delta^n \ln \Delta}, \quad (197)$$

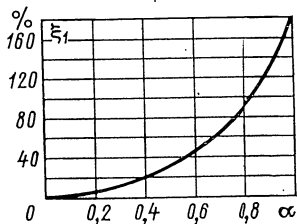


Рис. 61. Зависимость относительной погрешности при вычислении потерь в обкладках от величины $\alpha = \omega/\omega_c$

где

$$R_{об. уд} = 2\rho_m \frac{1}{b_{\phi} d_{\phi}},$$

$$z_c = \sqrt{\frac{L_{об. уд}}{C_{об. уд}}}.$$

При учете индуктивности секции относительная погрешность при вычислении потерь по формуле (193) по сравнению с потерями, вычисленными по (161), равна

$$\xi = \frac{P'_{\phi} - P_{\phi}}{P_{\phi}} = \frac{1,5}{\alpha^2 \cos^2 \alpha} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right) - 1. \quad (198)$$

Зависимость относительной погрешности при вычислении потерь в обкладках от величины α приведена на рис. 61.

19. Определение наибольшей температуры перегрева изоляции конденсатора

Определение перегрева центральной части диэлектрика конденсатора может быть выполнено достаточно просто, если принять, что мощность $P_{уд}$, выделяемая в единице объема конденсатора, не зависит от температуры. Величина $P_{уд}$ может быть вычислена, исходя из мощности, выделяемой во всем конденсаторе:

$$P_{уд} \approx \frac{P_{\kappa}}{V_{ак}}, \quad (199)$$

где $V_{ак}$ — активный объем конденсатора, занятый секциями.

Величина P_K может быть вычислена по одной из формул, приведенных в гл. 5, § 18.

Если имеется симметричный ряд слоев диэлектрика с координатами $z_1, z_2, \dots, z_k$ (отсчет ведется от середины центрального слоя) и соответственно коэффициентами теплопроводности $k_1, k_2, \dots, k_k$, то, если поток тепла направлен поперек слоев, для каждого слоя справедливо уравнение

$$k_i \frac{d^2 T}{dz^2} + P_{уд} = 0. \quad (200)$$

Двукратное интегрирование уравнения (200) в пределах от z_{i-1} до z_i с учетом граничных условий

$$k_{i-1} \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=z_i} = k_i \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=z_i}$$

$$\text{и} \quad \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = 0$$

дает [48]

$$\Delta T_i = T_i - T_{i-1} = \frac{P_{уд} (z_i^2 - z_{i-1}^2)}{2k_i}. \quad (201)$$

Рассмотрим сечение конденсатора, изображенное на рис. 62 [49]. Внутри объема, ограниченного штриховой линией, теплоотвод определяется теплопроводностью вдоль слоев, которая вследствие наличия фольги намного больше теплопроводности поперек слоев. Коэффициент теплопроводности вдоль слоев

$$k_{\parallel} = k_{\phi} \frac{d_c}{d_c + d_{\phi}} + k_{\phi} \frac{d_{\phi}}{d_c + d_{\phi}}, \quad (202)$$

где k_{ϕ} — коэффициент теплопроводности пропитанной конденсаторной бумаги; k_{ϕ} — коэффициент теплопроводности фольги; d_c — толщина слоя изоляции в секции между листами фольги; d_{ϕ} — толщина фольги.

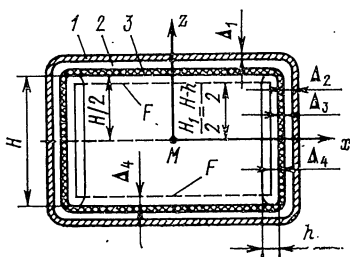


Рис. 62. К расчету максимальной температуры внутри конденсатора

1 — бак; 2 — масляная прослойка; 3 — изоляция секций от бака

В слое $\Delta_4 = h/2$ поток тепла идет перпендикулярно слоям и коэффициент теплопроводности

$$k_{\perp} = \frac{k_{\phi} k_{\sigma} (d_{\sigma} + d_{\phi})}{k_{\sigma} d_{\phi} + k_{\phi} d_{\sigma}}. \quad (203)$$

Перепад температуры между центральной точкой пакета и наружной поверхностью секций, которая приблизительно может быть принята за изотермическую поверхность, на основании (201) будет равен (рис. 62):

$$\Delta T_1 = \frac{P_{уд}}{2} \left(\frac{H_1^2}{4k_{\parallel}} + \frac{H^2 - H_1^2}{4k_{\perp}} \right). \quad (204)$$

где $H_1 = H - h$.

Перепад температуры между наружной поверхностью секций и окружающей средой равен

$$\Delta T_2 = \frac{P_{\kappa}}{S} \left(\frac{\Delta_1}{k_1} + \frac{\Delta_2}{k_2} + \frac{\Delta_3}{k_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{в}}} \right), \quad (205)$$

где Δ_1, k_1 — толщина и коэффициент теплопроводности стенок бака; Δ_2, k_2 — толщина и коэффициент теплопроводности масляной прослойки, Δ_3, k_3 — толщина и коэффициент теплопроводности изоляции секций от стенок бака; $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности бака в окружающую среду; S — поверхность бака конденсатора, приблизительно равная наружной поверхности пакета секций.

На основании (199), (204) и (205) имеем полный перепад температуры между центральной точкой пакета секций и окружающей средой:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = P_{\kappa} \left[\frac{1}{2V_{\text{ак}}} \left(\frac{H_1^2}{4k_{\parallel}} + \frac{H^2 - H_1^2}{4k_{\perp}} \right) + \frac{1}{S} \left(\frac{\Delta_1}{k_1} + \frac{\Delta_2}{k_2} + \frac{\Delta_3}{k_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{в}}} \right) \right]. \quad (206)$$

Для конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией перепад температуры ΔT не должен превышать 35°C , а для конденсаторов с пропиткой хлордифенилами или касторовым маслом — 60°C .

По формуле (206) при заданном значении ΔT можно определить P_{κ} и соответственно допустимые значения рабочих напряженностей в конденсаторе по его тепловому режиму.

РАСЧЕТ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

20. Расчет плавких предохранителей

В импульсных конденсаторах большой емкости на рабочее напряжение до 10—12 кВ (при параллельном соединении секций в конденсаторе) в большинстве случаев все секции соединяются с главными шинами через предохранители. Это позволяет повысить рабочую напряженность электрического поля в конденсаторе, так как пробой одной или даже нескольких секций не приводит к выходу конденсаторов из строя. В этом случае поврежденные секции должны надежно отключаться плавкими предохранителями.

Наиболее надежное перегорание предохранителя может быть обеспечено при параллельном соединении секций в конденсаторе, так как при наличии последовательного соединения хотя бы двух секций пробой одной из них обычно не сразу приводит к пробойу второй. В этом случае ток через плавкий предохранитель поврежденной цепочки секций ограничен емкостным сопротивлением здоровой секции, что затрудняет обеспечение условий его надежного перегорания. В связи с этим в конденсаторах с плавкими предохранителями напряжение конденсатора равно напряжению секций и поэтому не превосходит 10—12 кВ.

Рассмотрим расчет плавких предохранителей. При выборе предохранителя учитываются следующие условия: а) отсутствие повреждения (перегорания или динамического разрушения) при наибольшем разрядном токе конденсатора; б) надежное перегорание предохранителя при пробое секции.

Так как пробой секции может иметь место в процессе работы конденсатора при напряжении ниже номинального или во время зарядки, то обычно считают, что предохранитель должен надежно сгорать при напряжении выше $0,5 U_p$. При более низком напряжении пробой секции считается маловероятным.

Рассмотрим конденсатор, состоящий из m параллельно соединенных секций.

Так как активное сопротивление предохранителя обычно значительно больше активного сопротивления других элементов конденсатора, то в первом приближении можно считать, что при пробое секции в предохранителе выделяется вся энергия, запасенная в остальных неповрежденных $m-1$ секциях:

$$W_{\text{пр}} = \frac{(m-1) C_c (0,5U_p)^2}{2}, \quad (207)$$

где C_c — емкость одной секции.

С другой стороны, энергия плавления $W_{пл}$ предохранителя

$$W_{пл} = [C_T (T_{пл} - T_1) + C_{пл}] G_{пр}, \quad (208)$$

где C_T — теплоемкость металла предохранителя; $T_{пл}$ — температура плавления этого металла; T_1 — температура предохранителя перед пробоем секции; $C_{пл}$ — теплота плавления металла; $G_{пр}$ — масса предохранителя.

Из выражений (207) и (208) при условии $W_{пр} = W_{пл}$ может быть определена масса предохранителя:

$$G_{пр} = \frac{W_{пр}}{C_T (T_{пл} - T_1) + C_{пл}}. \quad (209)$$

Объем плавкого предохранителя

$$V_{пр} = G_{пр} / \gamma_{пр}, \quad (210)$$

где $\gamma_{пр}$ — плотность металла предохранителя.

Радиус $r_{пр}$ и длина $l_{пр}$ предохранителя при полученной величине $V_{пр}$ определяется из соображений, чтобы сопротивление предохранителя, с одной стороны, не сказывалось существенно на уменьшении добротности конденсатора (было бы меньше эквивалентного активного сопротивления одной секции) и, с другой стороны, было бы заметно больше эквивалентного активного сопротивления всего конденсатора.

Рассмотрим термическую устойчивость предохранителя в нормальном режиме работы конденсатора.

В разрядном режиме мощность, выделяющаяся в предохранителе, равна для колебательного режима разряда в соответствии с (180):

$$P_{пр} = \frac{1}{2} I_{см}^2 R_{пр} \tau_{эkv} z_1 \quad (211)$$

и для аperiodического режима разряда в соответствии с (181):

$$P_{пр} = I_{см}^2 R_{пр} \tau_{эkv} z_1, \quad (212)$$

где $I_{см}$ — максимальный ток одной секции в разрядном режиме; $R_{пр}$ — активное сопротивление предохранителя; $\tau_{эkv}$ — эквивалентная длительность импульса; z_1 — количество импульсов в секунду.

При равномерном распределении тока по m секциям величина $I_{см}$ определяется амплитудой тока I_m конденсатора

$$I_{см} = I_m / m.$$

Для колебательного режима разряда конденсатора величина $\tau_{эkv}$ может быть определена по (183), для аperiodического режима — по (186) и для критического аperiodического режима — по (192).

Мощность, отводимая от предохранителя при расположении его в жидком диэлектрике конденсатора,

$$P_{отв} = \lambda S_{пр} (T_{пр} - T_m), \quad (213)$$

где $S_{пр} = 2\pi r_{пр} l_{пр}$ — поверхность предохранителя, имеющего диаметр $2r_{пр}$ и длину $l_{пр}$; $T_{пр}$ и T_m — температура соответственно

предохранителя и масла; λ — коэффициент теплоотдачи с поверхности предохранителя в окружающее пространство. При нахождении предохранителя в жидком диэлектрике при перегреве предохранителя относительно жидкости порядка десятков градусов величина λ может быть принята равной 10^{-2} вт/(град·см²).

Нормальный режим работы предохранителя в условиях повторяющихся разрядов конденсатора на нагрузку может быть обеспечен при $P_{пр} < P_{отв}$.

В ряде случаев для того, чтобы при сгорании предохранителя не возникала ударная волна в жидком диэлектрике, производящая к повреждению соседних предохранителей, участков секций или изолирующих прокладок, предохранители располагаются между секциями внутри диэлектрика секции (рис. 63).

21. Механические усилия в импульсных конденсаторах

В импульсных конденсаторах в разрядном режиме часто протекают весьма значительные токи, достигающие иногда 500 ка. При этом различные элементы конденсатора — выводы секций, сборные шины, выводы конденсатора — подвергаются значительным импульсным механическим нагрузкам. Обычно наибольшим нагрузкам подвергаются сборные шины и выводы конденсатора.

В тех случаях, когда элементы конденсатора представляют собой две плоских шины, в которых токи протекают в противоположные стороны, механическая нагрузка $F_{уд}$ на единицу площади шин может быть определена из формулы:

$$F_{уд} = \frac{\mu_0 H^2}{2}, \quad (214)$$

где H — напряженность магнитного поля.

Для случая плоских шин

$$H = I_{mш}/b_{ш}, \quad (215)$$

где $I_{mш}$ — амплитуда тока, протекающего по шине; $b_{ш}$ — ширина шины.

Используя (214) и (215), имеем

$$F_{уд} = 0,102 \frac{4\pi \cdot 10^{-7} I_{mш}^2}{2b_{ш}^2} = 6,4 \cdot 10^{-8} \frac{I_{mш}^2}{b_{ш}^2}, \quad (216)$$

где $I_{mш}$ — в а, $b_{ш}$ — в см, $F_{уд}$ — в кгс/см².

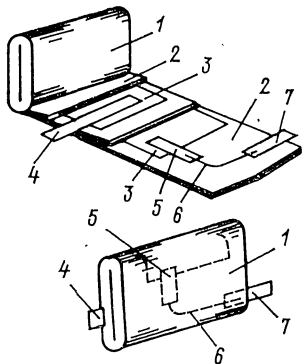


Рис. 63. Секция конденсатора с предохранителем

1 — секция; 2 — конденсаторная бумага; 3 — обкладки из алюминиевой фольги; 4, 5, 7 — металлические вкладыши; 6 — плавкий предохранитель

Если выводы конденсатора представляют собой два стержня длиной $l_{\text{в}}$, расположенных на расстоянии $d_{\text{в}}$ друг от друга, то сила, действующая на каждый из стержней, равна [50]:

$$F = 2,04 \cdot 10^{-8} I_m \left(\sqrt{\frac{l_{\text{в}}^2}{d_{\text{в}}^2} + 1} - 1 \right), \text{ кгс.} \quad (217)$$

Если $l_{\text{в}} \gg d_{\text{в}}$, то сила, действующая на единицу длины стержня,

$$F_{\text{уд}} = \frac{F}{l} = \frac{2,04 \cdot 10^{-8} I_m^2}{d_{\text{в}}}, \text{ кгс.} \quad (218)$$

В конденсаторах, рассчитанных на большие импульсные токи, применяют специальные мероприятия для усиления динамической устойчивости электрических соединений и выводов. В этом случае конструкцию целесообразно выполнять таким образом, чтобы механические усилия были переданы на металлический бак конденсатора. Контактные соединения секций и шин, соединяющих секции, а также выводы конденсатора должны обладать высокой динамической устойчивостью. Обычно надежные контактные соединения в конденсаторах для генераторов больших импульсных токов обеспечиваются при удельном давлении в контакте $5\text{--}10 \text{ кгс/см}^2$ при плотности тока в контактном соединении, не превышающей 10 а/мм^2 . При таких условиях в конденсаторах надежно работают контактные пары медь—медь, медь—алюминий, алюминий—сталь.

Глава 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРОВ

22. Измерение индуктивности конденсаторов

Эквивалентная индуктивность импульсного конденсатора может быть найдена путем определения первой (низшей) резонансной частоты конденсатора.

Схема измерения приведена на рис. 64. В процессе измерения ламповый вольтметр должен быть присоединен непосредственно на зажимы конденсатора таким образом, чтобы в измерительный контур не входили дополнительные элементы цепи, входящие в основной контур (генератор — ограничительное сопро-

тивление — конденсатор). Для более четкого измерения величина ограничительного сопротивления должна выбираться много больше эквивалентного активного сопротивления конденсатора R_K при резонансной частоте.

В процессе измерения необходимо учитывать, что конденсатор представляет собой цепную схему и может иметь ряд резонансных частот. Поэтому важно правильно определить нижнюю резонансную частоту конденсатора f_p .

Емкость конденсатора C_K может быть определена обычными мостовыми схемами на низких частотах, так как для большинства конденсаторов (с диэлектриком из бумаги, пропитанной конденсаторным или касторовым маслом, из полиэтиленовой, полистирольной или фторопластовой пленки), за исключением конденсаторов с хлорированным жидким диэлектриком, с изменением частоты до нескольких мегагерц емкость конденсатора изменяется не более чем на 5%. Зная емкость конденсатора C_K , его индуктивность L_K легко определяется по соотношению:

$$L_K = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C_K}. \quad (219)$$

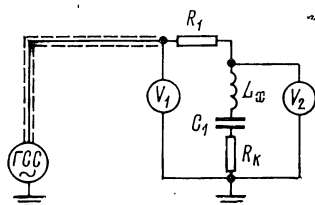


Рис. 64. Схема измерения индуктивности и добротности конденсаторов с помощью генератора стандартных сигналов. R_1 — ограничивающее сопротивление; V_1 и V_2 — милливольтметры ламповые; C_1 — емкость конденсатора; L_x — индуктивность конденсатора; R_K — активное сопротивление конденсатора

23. Измерение добротности конденсаторов

Добротность конденсатора Q_K , или эквивалентное активное сопротивление конденсатора, может быть определена следующими способами.

1. Измерением активного сопротивления R_K при резонансной частоте по схеме рис. 64. В этом случае, если известно R_1 и напряжения U_1 и $U_K = U_2$, то, учитывая, что обычно $R_1 \gg R_K$ величина R_K определится из соотношения $R_K = R_1 U_K / U_1$.

2. Определением декремента Δ_0 колебаний, возбужденных в контуре, замкнутом на малую индуктивность (без искрового промежутка), считая, что в этом случае дополнительными потерями во внешней цепи контура можно пренебречь.

Для этой цели используются два индуктивно связанных контура, причем один из которых, состоящий из исследуемого конденсатора и малоиндуктивной петли, слабо связан с возбуждающим контуром, состоящим из конденсатора и катушки, обладающим значительно меньшей частотой колебаний (рис. 65).

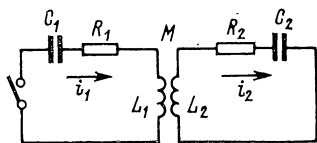


Рис. 65. Схема двух индуктивно связанных контуров

Согласно [51], при наличии двух индуктивно связанных контуров, в одном из которых происходит разряд емкости, заряженной до напряжения U (см. рис. 65), ток во втором контуре определяется выражением:

$$i_2 = \frac{UM}{L_1 L_2 (1 - k^2) (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)} (\Omega_1 e^{-\beta_1 t} \sin \Omega_1 t - \Omega_2 e^{-\beta_2 t} \sin \Omega_2 t), \quad (220)$$

где

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2(1 - k^2)}} - \sqrt{\left[\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2(1 - k^2)} \right]^2 - \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{1 - k^2}}; \quad (221)$$

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2(1 - k^2)}} + \sqrt{\left[\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2(1 - k^2)} \right]^2 - \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{1 - k^2}}; \quad (222)$$

$$\beta_1 = \frac{\delta_1 \omega_2^2 + \delta_2 \omega_1^2 - \Omega_1^2 (\delta_1 + \delta_2)}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4k^2 \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (223)$$

$$\beta_2 = \frac{\Omega_2^2 (\delta_1 + \delta_2) - \delta_1 \omega_2^2 - \delta_2 \omega_1^2}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4k^2 \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (224)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}; \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}; \quad \delta_1 = \frac{R_1}{2L_1};$$

$$\delta_2 = \frac{R_2}{2L_2}; \quad k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

и L_1 , C_1 , R — индуктивность, емкость и активное сопротивление первого контура; L_2 , C_2 , R_2 — индуктивность, емкость и активное сопротивление второго контура.

Так как контуры 1 и 2 обычно обладают малыми затуханиями, то можно допустить $\delta_1 \ll \omega_1$ и $\delta_2 \ll \omega_2$. Правильное определение декремента колебаний в исследуемом контуре (контур 2) возможно, если $\Omega_2 \approx \omega_2$ и $\beta_2 \approx \delta_2$, характеризующая затухание колебаний второго контура, не зависит от параметров первого контура. Из выражений (222) и (224) следует, что эти требования выполняются при условиях: 1) частота собственных колебаний второго контура значительно выше частоты колебаний первого контура $\omega_2 \gg \omega_1$; 2) величина коэффициента связи весьма мала $M \ll \sqrt{L_1 L_2}$.

Для соблюдения этих условий в схемах измерения в первый возбуждающий контур включается катушка с индуктивностью L_1 , незначительно превышающей величину L_2 . Малый коэффициент связи между контурами обеспечивается малой площадью петли второго контура и соответствующим расстоянием между петлей и индуктивностью L_2 . При осциллографировании падения напряжения на внешней индуктивности второго контура используется осциллограф для однократной записи быстрых процессов, имеющий усилитель с достаточно широкой полосой пропускания.

24. Испытание конденсаторов

Испытание конденсаторов на низком напряжении заключается в измерении емкости и $\operatorname{tg} \delta$. Оба эти измерения обычно производятся при низком напряжении (до 100 в) промышленной частоты при температуре 20—25° С. Допустимые отклонения от номинальной емкости чаще всего составляют +20÷—10%. Вели-

чина $\operatorname{tg} \delta$ бумажно-масляных конденсаторов обычно должна быть не более 0,0045, и для бумажно-касторовых или бумажно-трихлордифениловых конденсаторов — не более 0,006.

Испытание конденсаторов на высоком напряжении включает в себя: 1) испытание высоким выпрямленным напряжением; 2) определение динамической устойчивости конденсатора на предельно допустимый ток в разрядном режиме; 3) определение добротности конденсатора (потерь в конденсаторе) в рабочем режиме; 4) измерение сопротивления изоляции.

Испытание высоким выпрямленным напряжением производится на обычных схемах выпрямления, причем величина испытательного напряжения обычно равна $1,2 \div 1,5 U_p$. Нижнее значение соответствует конденсаторам, предназначенным для работы в режиме аperiodического разряда, верхнее — в режиме колебательного разряда. Длительность испытаний составляет 1—3 мин.

В процессе испытаний в ряде случаев контролируется ток утечки, измеряемый после одноминутной выдержки при рабочем напряжении. При этом сопротивление конденсатора должно быть не ниже $1000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$.

Определение динамической устойчивости производится испытаниями в разрядном режиме на разрядный контур, обеспечивающий протекание номинального тока конденсатора при номинальном напряжении. Обычно каждый конденсатор подвергается воздействию 20 разрядов при номинальном напряжении. В ряде случаев для конденсаторов, предназначенных для работы в режиме колебательных разрядов, испытания производятся при напряжении, превышающем номинальное, на 10 %.

Отсутствие повреждений в конденсаторе в процессе испытаний определяется по отсутствию слышимых разрядов внутри конденсатора, а также по неизменности емкости конденсатора, измеренной до и после испытаний.

Определение динамической устойчивости конденсатора и его добротности на высоком напряжении обычно наталкивается на значительные трудности; так как весьма сложно обеспечить достаточно малую

индуктивность разрядного устройства и малые потери энергии в этом устройстве.

Хорошие результаты при таких испытаниях могут быть получены при применении специальных малоиндуктивных вакуумных разрядников (рис. 66). Электроды разрядника на 50 кВ представляют собой два изолированных друг от друга медных диска. В качестве изоляции используется кольцо из оргстекла толщиной 10 мм. Герметизация разрядника осуществляется при помощи резиновых прокладок, располо-

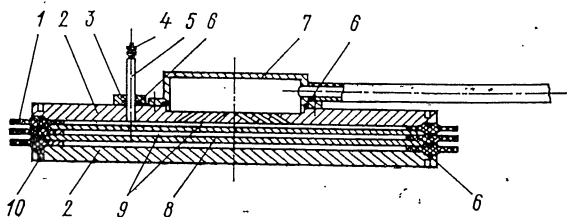


Рис. 66. Конструкция вакуумного разрядника

1 — изолирующие кольца из оргстекла; 2 — стальные электроды; 3 — кольцо и втулка с резиновым уплотнением; 4 — поджигающий электрод; 5 — фарфоровая втулка; 6 — резиновые уплотняющие кольца; 7 — детали системы вакуумной откачки; 8 — стальные перегородки; 9 — фрезерованные щели; 10 — резьбовое отверстие для креплений кабелей или шин [38]

женных в кольцевых пазах электродов. Работа разрядника обычно производится при остаточном давлении $(1-5) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Конденсатор присоединяется к электродам разрядника либо плоскими шинами с промежуточной полиэтиленовой изоляцией, либо системой коаксиальных кабелей.

Эквивалентное активное сопротивление разрядника зависит от протекаемого тока: при токе 100 ка оно не превосходит $5 \cdot 10^{-3}$ ом. Индуктивность разрядника при различных конструктивных исполнениях (круглый, прямоугольный) колеблется от $15 \cdot 10^{-9}$ гн до $2 \cdot 10^{-9}$ гн.

Если измерение тока утечки на высоком напряжении затруднено, то производится измерение сопротивления изоляции конденсатора при постоянном напряжении (обычно при 500 в) после одноминутного при-

ложения напряжения. В этом случае сопротивление изоляции должно быть не ниже 2000 *Мом · мкф*.

Сопротивление изоляции (постоянная времени саморазряда τ_k) конденсатора может быть определено также по саморазряду конденсатора, заряженного до $\overset{=}{U}$ определенного напряжения U_0 , т. е. $u_c = U_0 e^{\frac{-t}{\tau_k}}$.

При $t = \tau_k$ $u_c = U_0 / e \approx 0,37 U_0$. Таким образом, постоянная времени саморазряда определяется числом секунд, по истечении которых напряжение на выводах конденсатора уменьшается в e раз.

Если в процессе испытания измерить напряжение на конденсаторе u_{c1} через время t_1 , то постоянная времени саморазряда $\tau_k = t_1 / \ln \frac{U_0}{u_{c1}}$. Обычно определение постоянной времени саморазряда производится при зарядном напряжении порядка киловольт.

Глава 8

ТИПЫ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ И ИХ КОНСТРУКЦИЯ

25. Отечественные типы малоиндуктивных импульсных конденсаторов

Большинство малоиндуктивных конденсаторов выполняется в металлическом баке либо с металлической крышкой, имеющей специальный малоиндуктивный коаксиальный вывод, либо с изоляционной крышкой, имеющей выводы в виде двух рядов болтов, разделенных изоляционной перегородкой. Типичные конструкции выводов первого и второго вида изображены на рис. 67 и 68.

Конденсаторы на рабочее напряжение 100 кВ и более выполняются в ряде случаев в изоляционном корпусе.

В НИПҚТИ конденсаторостроения и на заводе «Конденсатор» освоено производство ряда типов кон-

денсаторов, предназначенных для получения больших импульсных токов, с изоляцией из конденсаторной бумаги, пропитанной конденсаторным маслом [52—56].

Основные характеристики этих конденсаторов приведены в табл. 8.

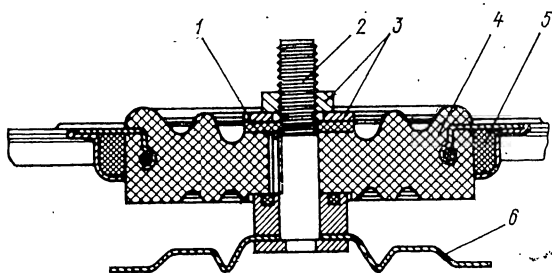


Рис. 67. Конструкция коаксиального малоиндуктивного вывода
1 — изоляционная шайба; 2 — выводной болт; 3 — металлическая шайба с гайкой; 4 — изолятор; 5 — металлический уплотнитель; 6 — пружинящий диск

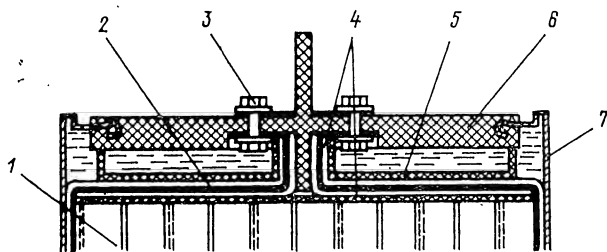


Рис. 68. Конструкция малоиндуктивного вывода с изоляционной перегородкой

1 — секция; 2 — токоведущая шина; 3 — вывод; 4 — междушинная изоляция; 5 — прижимная планка; 6 — изоляционная крышка; 7 — бак

Ниже дается описание некоторых типов этих конденсаторов.

Конденсатор ИМ 30-3 ($U_p=30$ кв, $C_k=3$ мкф) предназначен для работы в режиме повторяющихся колебательных разрядов (рис. 69, б). Максимальный ток в разрядном режиме не должен превосходить 200 ка. Конденсатор выполнен в металлическом корпусе с изоляционной крышкой. Уменьшение индук-

Импульсные конденсаторы для получения больших токов НИП КТИ конденсаторостроения
и завода «Конденсатор»

Тип конденсатора	U _p , кВ	C _K , мкФ	W _K , Дж	L _K , мкГн	I _m , кА	Количество импульсов в минуту	Габариты, мм	Масса, кг	Удельная энергия		Гарантийный срок службы (число импульсов)	Пропитка
									Дж/м ²	Дж/кг		
ИМ 3-100*	3	100	450	0,04	—	100	380×110×370	25	29	18	10 ⁵	Конденсаторное масло
ИМ 3-230*	3	230	1035	0,5	1,5	10	310×138×800	60	31	17,2	10 ⁴	»
ИМН 5-140*	5	140	1750	0,6	—	50	310×138×800	57	51	31	10 ³	»
ИМУ 5-140	5	140	1750	0,05	150	10	310×138×800	60	51	29	10 ³	»
ИС 5-200	5	200	2500	0,6	10	10	310×138×800	65	73	38,5	10 ⁴	Трихлордифенил
ИК 6-150	6	150	2700	0,05	50	1	310×138×640	45	99	59	2·10 ⁴	Капастовое масло
ИКУ 6-150	6	150	2700	0,05	50	1	310×138×475	36	133	75	10 ⁴	»
ИМП 6-150	6	150	2700	0,05	50	1	310×138×640	45	99	59	2·10 ⁴	Конденсаторное масло
ИС 6-200	6	200	3600	0,6	—	100	309×133×680	55	133	65	2·10 ⁴	Бумажно-плёночная
ИС 10-50	10	50	2500	0,1	10	2	310×138×640	50	92	50	10 ³	Трихлордифенил
ИС 20-6,65	20	6,65	1330	0,5	10	0,3	570×128×353	49	52	27	10 ⁴	»
ИМ 20-8	20	8	1600	0,025	300	1	314×314×880	145	18,4	11	10 ³	Конденсаторное масло
ИК 25-12	25	12	3750	0,04	200	1	314×314×670	110	54	34	3·10 ³	Капастовое масло
ИМ 30-0,2	30	0,2	90	—	5	20 шт	379×119×325	30	6,2	3	7·10 ⁵	Конденсаторное масло
ИМ 30-3	30	3	1350	0,05	200	1	314×314×880	140	15,5	9,4	10 ⁴	»
ИМ 30-20	30	20	9000	—	200	1	795×431×1325	750	20	12	10 ⁴	»
ИК 40-5	40	5	4000	0,04	200	1	314×314×670	110	57	36	3·10 ³	»
ИКТ 50-1	50	1	1250	0,5	20	120	314×314×670	150	19	8	3·10 ³	»
ИМ 50-1,5	50	1,5	1880	0,03	200	1	314×314×680	110	27	17	10 ³	Минеральное масло
ИК 50-3	50	3	3750	0,04	200	1	314×314×670	110	54	34	3·10 ³	Конденсаторное масло
ИМ 50-3	50	3	3750	0,01	300	1	314×314×670	110	54	34	3·10 ³	»
ИМТ 80-1	80	1	3200	0,4	7,5	10-12	723×651×1010	750	5,1	4,4	3·10 ⁴	Минеральное масло
ИМН 100-0,1	100	0,1	500	0,2	10	3	455×150×326	32	22,4	16,6	10 ⁴	»
ИК 100-0,25	100	0,25	1250	0,15	80	2	455×150×326	32	56	41,6	2·10 ³	Капастовое масло

* Облегченный режим — аperiodический или сильно затухающий колебательный разряд.

тивности достигнуто за счет параллельного соединения пакетов секций 4 при помощи двух широких

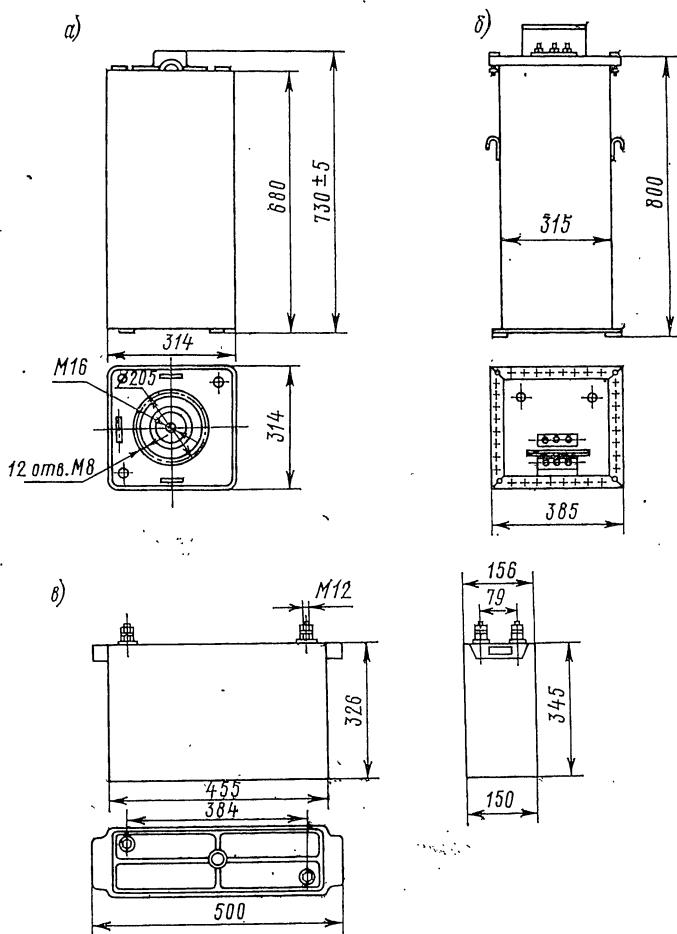


Рис. 69. Малоиндуктивные конденсаторы завода «Конденсатор»: а — ИК 25-12, ИК 40-5, ИК 50-3; б — ИМ 30-3; в — ИК 100-0,25

плоских шин 1, расположенных одна под другой, присоединенных к плоским выводам 2, разделенным изоляционной перегородкой 3 (рис. 70). При этом внут-

ренная индуктивность не превосходит 30—50 нГн. В конденсаторе применена бумажная изоляция, пропитанная конденсаторным маслом, работающая при напряженности 46,3 кВ/мм.

Конденсатор ИМ 30-20 ($U_p=30$ кВ, $C_k=20$ мкФ) имеет весьма большую энергию $W_k=9$ кДж. Его выемная часть состоит из 12 пакетов, соединенных между собой параллельно. Секции в пакетах соединены смешанно. Конденсатор имеет один высоковольтный вывод (другой вывод соединен с корпусом), он предназначен для работы в мощных колебательных контурах и выполнен с бумажно-масляной изоляцией.

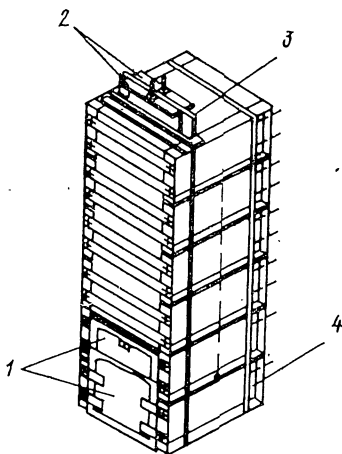


Рис. 70. Выемная часть конденсатора ИМ 30-3

Конденсатор ИМГ 80-1 предназначен для работы в импульсных установках, использующих электрогидравлический эффект. Выемная часть конденсатора ИМГ 80-1 состоит из 12 параллельно соединенных пакетов. Секции в пакетах соединены последовательно.

Конденсатор имеет один высоковольтный вывод, другой вывод соединен с корпусом и выполнен с бумажной изоляцией, пропитанной минеральным маслом. В конденсаторе применена пониженная рабочая напряженность, равная 31,8 кВ/мм, обеспечивающая большой срок службы в режиме повторяющихся разрядов.

Конденсатор ИМН 5-140 ($U_p=5$ кВ, $C_k=140$ мкФ) предназначен для работы в облегченном режиме (апериодический или сильно затухающий колебательный разряд при ограниченном токе до 2,5 кА). Конденсатор выполнен в стальном сварном корпусе. Крышка, соединенная с корпусом электросваркой, имеет два фарфоровых вывода, герметично впаянных в корпус (рис. 71, а). Вес конденсатора 65 кг. Все секции

в конденсаторе соединены параллельно, толщина изоляции секций $10 \times 7 = 70$ мкм. Каждая секция защищена индивидуальным предохранителем, отключающим секцию при ее повреждении. При этом конденсатор продолжает нормально работать при весьма незначительном снижении емкости. Применение предохранителей позволило использовать в конденсаторе

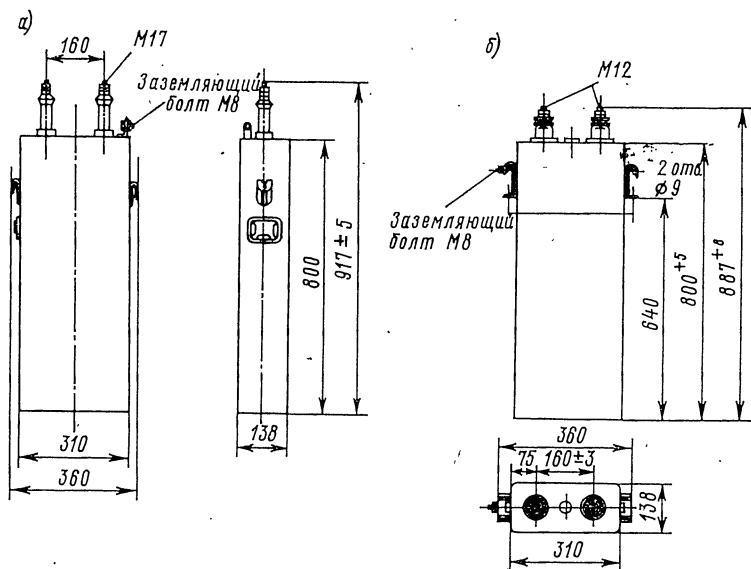


Рис. 71. Конденсаторы ИМН 5-140 (а) и ИС 5-200 (б) НИПКТИК и завода «Конденсатор»

повышенную рабочую напряженность электрического поля, равную 71,5 кВ/мм, и обеспечить высокое значение удельной энергии (51 Дж/дм³ и 31 Дж/кг).

Для уменьшения индуктивности в конденсаторе ИМУ 5-140 выводы секций припаиваются к общим шинам, близко прилегающим друг к другу, из которых одна соединена с металлическим корпусом, другая выведена через низкий изолятор с фторопластовой изоляцией. Величина собственной индуктивности конденсатора равна 0,05 мкГн.

Наряду с пропиткой нефтяным маслом многие типы импульсных конденсаторов для получения больш-

ших значений удельной энергии пропитываются трихлордифенилом (тип ИС) или касторовым маслом (тип ИК).

Конденсаторы типов ИК 25-12 ($U_p=25$ кВ, $C_k=12$ мкФ), ИК 40-5 ($U_p=40$ кВ, $C_k=5$ мкФ) и ИК 50-3 ($U_p=50$ кВ, $C_k=3$ мкФ) выполняются в корпусах с одинаковыми габаритными размерами (см. рис. 69, а) и имеют одинаковую конструкцию коаксиального вывода с литой эпоксидной изоляцией, обеспечивающей достаточно малую индуктивность всего конденсатора ($L_k=40$ нГн).

Высоковольтный вывод выполнен в виде стержня с резьбой М16, низковольтным выводом является стальное кольцо, окружающее изолятор и соединенное с корпусом.

Конденсатор рассчитан на работу в режиме повторяющихся колебательных разрядов с декрементом колебаний не менее 1,5. Максимальный разрядный ток не должен превосходить 200 кА. Гарантийный срок службы — не менее 3000 импульсов. В конденсаторах применена бумажная изоляция, пропитанная касторовым маслом. Рабочая напряженность равна 70 кВ/мм.

Конденсатор предназначен для работы в закрытых помещениях при температуре окружающей среды от $+1^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха не более 80% при температуре $+20^\circ\text{C}$.

Модификацией конденсатора ИК 50-3 является конденсатор ИКМ 50-3. Конденсатор имеет аналогичные размеры корпуса, однако выполнен коаксиальным изолятором из оргстекла, имеющим больший диаметр центрального высоковольтного вывода (цилиндр диаметром 138 мм). Конденсатор имеет меньшую внутреннюю индуктивность ($L_k=10$ нГн) и рассчитан на больший разрядный ток (до 300 кА).

Конденсатор типа ИК 100-25 ($U_p=100$ кВ, $C_k=0,25$ мкФ) выполнен в изоляционном (полиэтиленовом) корпусе, на крышке которого расположены два металлических вывода (рис. 69, в). Конденсатор предназначен для работы в режиме колебательных разрядов с декрементом колебаний не менее 1,5 при гарантированном сроке службы $2 \cdot 10^3$ импульсов. В конденсаторе применена бумажная изоляция с пропиткой касторовым маслом при напряженности 70 кВ/мм.

Аналогично конденсатору ИМН 5-140 выполняется конденсатор типа ИС 5-200 ($U_p=5$ кВ, $C_k=200$ мкф) с изоляцией из бумаги, пропитанной трихлордифенилом (см. рис. 71, б). Рабочая напряженность принята равной 71,5 кВ/мм. Секции конденсатора соединены со сборными шинами через плавкие предохранители. Конденсатор допускает максимальную амплитуду разрядного тока 10 кА. Гарантированный срок службы — 10^4 импульсов.

Близким по конструкции является конденсатор типа ИС 6-200 ($U_p=6$ кВ, $C_k=200$ мкф, рис. 71, б), в котором достигнуты более высокие значения удельной энергии ($W_{уд}=130$ Дж/дм³) за счет увеличения рабочей напряженности электрического поля до 100 кВ/мм.

Еще более высокая напряженность 111 кВ/мм применена в конденсаторе типа ИМП 6-150 ($U_p=6$ кВ, $C_k=150$ мкф) с бумажно-пленочной изоляцией пропитанной минеральным маслом.

В лаборатории ТВН Ленинградского политехнического института разработан ряд типов малоиндуктивных импульсных конденсаторов, которые отличаются большей частотой в разрядном режиме, что достигается за счет снижения внутренней индуктивности конденсаторов. Несколько типов имеют также значительно уменьшенные потери в разрядном режиме или повышенную добротность, которая в различных типах конденсаторов колеблется от 60 до 300, при частоте 1 МГц.

Конструкция вывода позволяет производить малоиндуктивное соединение со сборными шинами, соединительными кабелями или коммутирующими разрядниками.

Уменьшение индуктивности конденсаторов было достигнуто за счет применения специальной схемы соединения секций и способа расположения выводов в секциях (см. рис. 51).

В конденсаторах с энергией в единице более 1000 Дж, в соответствии с формулами (128) и (130), уменьшение индуктивности рационально производить за счет увеличения ширины обкладок секции.

Практическая предельная ширина секции определяется шириной рулонов бумаги (которая может быть

использована на существующих намоточных станках), равной 300 мм. Поэтому увеличение эквивалентной ширины секции осуществлялось путем нанизывания нескольких параллельно включенных секций на общие шины. Такое параллельное нанизывание трех секций показано на рис. 72. Дальнейшее последовательно-параллельное соединение секций осу-

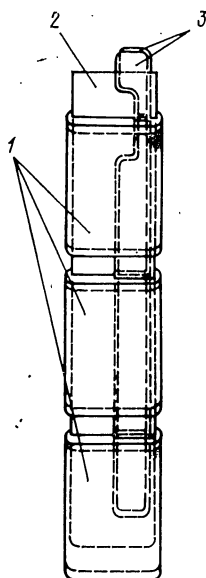


Рис. 72. Эскиз параллельного соединения секций

1 — секция; 2 — изолирующая прокладка; 3 — выводы

ществлялось по схеме, приведенной на рис. 51, а. Повышенная добротность конденсаторов обеспечивалась указанной схемой соединения секций, приводящей к уменьшению потерь в фольге за счет принудительного равномерного распределения тока между выводами секций и групп секций, соединенных параллельно. В ряде типов для уменьшения потерь в изоляции секций использовались пленки из неполярных диэлектриков. Выводы конденсаторов выполнялись в виде плоских шин, разделенных изоляционной перегородкой.

Для некоторых типов конденсаторов индуктивность вывода не превосходила $2 \cdot 10^{-9}$ гн.

В табл. 9 приведены характеристики разработанных конденсаторов. По режимам работы они могут быть разбиты на две группы.

Конденсаторы первой группы выполнены с изоляцией из конденсаторной бумаги, пропитанной касторовым или минеральным маслом или с бумажно-пленочной изоляцией.

На рис. 73, а приведена фотография конденсатора КМК 50-4. Габариты конденсатора составляют $525 \times 220 \times 675$ мм, его энергия — 5000 дж, вес — 98 кг. Конденсатор предназначен для работы в режиме повторяющихся колебательных или апериодических разрядов на малую индуктивность с частотой повторения не более 1 разряда в 10 сек. Срок службы конденсатора в указанном режиме не менее 10 000 разрядов.

**Импульсные конденсаторы для получения больших токов лаборатории ТВН
Ленинградского политехнического института**

№ группы	Тип конденсатора	$U_p, кВ$	$C_K, мкФ$	$W_K, дж$	$L_K, нГн$	Добротность при $f = 1 МГц$	$I_m, ка$	Паразиты, мМ	Масса, кг	Удельная энергия		Тип изоляции
										$дж/м^3$	$дж/кг$	
I	КМК 2,0-200**	2	200	400	8	22*	210	145×275×335	25	30	16	Конденсаторная бумага, пропитанная касторовым маслом Кабельная бумага, пропитанная конденсаторным маслом Лавсаново-бумажная
	КМК 25-0,5	25	0,5	156	15	5	100	73×222×254	6	37,7	26	
	КМК 25-5	25	5	1560	15	5*	400	445×225×640	67	24,4	23,3	
	КМК 30-10	30	10	4500	9	5*	400	695×160×640	95	63,4	47	
	КМК 35-5	35	5	3060	15	5*	400	520×175×640	103	52,3	30	
	КМК 50-0,7	50	0,7	875	30	5	150	275×205×370	36	42	24,2	
	КМК 50-4	50	4	5000	15	5*	500	525×220×675	98	65	51,2	
	КМК 100-0,3	100	0,3	1500	8	5*	200	450×110×660	50	45	30	
	КММ 150-0,6	150	0,6	6750	400	10*	150	900×450×1400	850	12	8	
	КБЛЭ 14-78	14	78	7650	40		4	315×230×310	38	360	198	
II	КФМС 25-0,025	25	0,025	8	13	300	30	180×290×85	6	2	1,3	Фторопластовая пленка То же Бумажно-полиэтиленовая То же
	КФМС 50-0,03	50	0,03	38	16	270	90	240×300×140	13,6	3,8	2,8	
	КПМ 50-0,1	50	0,1	120	28	60	80	280×180×385	22	5,7	5,7	
	КМВД 50-0,1	50	0,1	120	16	100	100	365×144×335	22	7,1	5,7	

* Значения добротности при резонансной частоте конденсатора.

** Конденсатор предназначен для работы в режиме 50 импульсов в секунду, срок службы 10⁷ импульсов.

10 000 разрядов. Толщина диэлектрика секций равна 10×10 мм, рабочая напряженность — 78 кВ/мм. Конденсатор выполняется в металлическом корпусе с изоляционной крышкой. Выемная часть состоит из двух

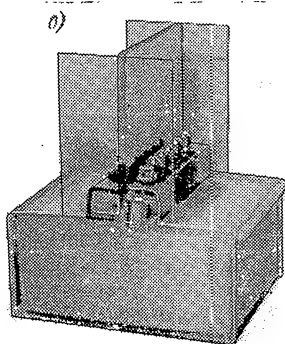
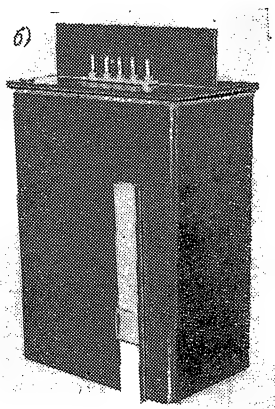
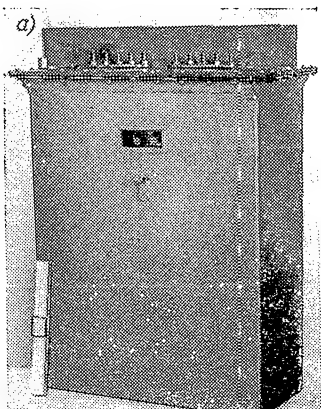


Рис. 73. Малоиндуктивные конденсаторы Ленинградского политехнического института:
 а — КМК 50-4 с бумажно-касторовой изоляцией, $U_p = 50$ кВ, $C_k = 4$ мкф; $L_k = 0,015$ мкГн;
 б — КПМ 50-0,1 с бумажно-полиэтиленовой изоляцией, $U_p = 50$ кВ; $C_k = 0,1$ мкф, $L_k = 0,028$ мкГн;
 в — КФМС 50—0,03 с фторопластовой изоляцией, $U_p = 50$ кВ, $C_k = 0,03$ мкф, $L_k = 0,016$ мкГн; $Q = 270$

пакетов секций, соединенных параллельно. Пакет состоит из нескольких групп секций, в каждой из которых две секции соединены параллельно согласно рис. 72, что как бы увеличивает общую ширину фольги группы. Группы секций соединяются между собой последовательно-параллельно по схеме рис. 51, а. Такая конструкция приводит к существенному уменьшению

индуктивности конденсатора до $12 \cdot 10^{-9}$ гн и увеличению резонансной частоты до $(0,8—1) \cdot 10^6$ гц.

Максимальный ток в разрядном режиме конденсатора превосходит 600 ка, однако динамическая устойчивость выводов позволяет получать с конденсатора предельный ток не более 500 ка при крутизне тока до $4 \cdot 10^{12}$ а/сек.

Конденсаторы второй группы характеризуются повышенной добротностью при частотах порядка 1 Мгц и предназначены для работы в режиме повторяющихся импульсов с малым затуханием или повторяющихся импульсов с высокочастотным заполнением. Длина пакета импульсов напряжения не более 1 мсек, частота 1—1,5 Мгц, интервал между пакетами импульсов 15—120 сек. Для уменьшения потерь в диэлектрике при частотах 1—5 Мгц применена комбинированная пленочно-бумажная (конденсаторы типа КПМ 50-0,1) или пленочная (конденсаторы типа КФМС) изоляция, в основу которых входят неполярные пленки (полистирол, полиэтилен, фторопласт-4).

Для комбинированной пленочно-бумажной изоляции величина $\text{tg } \delta$ зависит от соотношения между объемами, занимаемыми пленкой и бумагой см. формулу (5). Для имеющихся сортов конденсаторных бумаг и неполярных пленок добротность конденсатора и комбинированной пленочно-бумажной изоляции при частотах 1—2 Мгц обычно не превосходит 100 и чаще всего равна 60—80 [57]. Такую добротность имеют конденсаторы типа КПМ 50-0,1 на 50 кв, емкостью 0,1 мкф, предназначенные для работы в режиме колебательных разрядов с малым затуханием при частоте до 3 Мгц. Конденсатор выполняется в винипластовом корпусе (см. рис. 73, б). Вес конденсатора — 22 кг. Конструкция выводов выполнена согласно рис. 68. Для уменьшения потерь в диэлектрике в конденсаторе применена полиэтиленово-бумажная изоляция. При принятом соотношении между толщинами полиэтиленовой пленки и конденсаторной бумаги $\text{tg } \delta$ изоляции при частоте до 3 Мгц не превосходит $3 \cdot 10^{-3}$.

Индуктивность конденсатора не превосходит $3 \cdot 10^{-8}$ гн, что обеспечивает частоту собственных колебаний в разрядном режиме $(2,5—3) \cdot 10^6$ гц с доб-

ротностью 60—80 (декремент колебаний при разряде 1,04).

На рис. 74, *а* приведена осциллограмма колебаний для конденсатора, замкнутого накоротко, а на рис. 74, *б* — осциллограмма разряда конденсатора на вакуумный разрядник.

Для обеспечения добротности порядка 250—300 (при $f=1$ Мгц) в конденсаторах типа КФМС, работающих в режиме импульсов напряжения с высокочастотным заполнением, применена изоляция из неполярных пленок [58, 59].

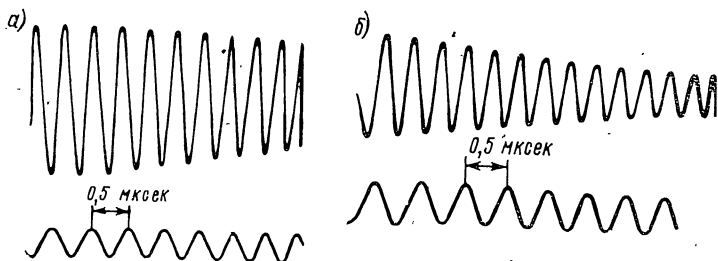


Рис. 74. Осциллограмма напряжений на внешней индуктивности конденсатора КПМ 50-0,1: *а* — возбуждение колебаний в короткозамкнутом контуре, $f_p=2,5$ Мгц, $Q=50$; *б* — разряд конденсатора на вакуумный разрядник, $U=50$ кВ, $f_p=2,7$ Мгц, $Q=50$

Конденсатор может быть использован в режиме импульсов напряжения (пакетов) высокой частоты до $2,5 \cdot 10^6$ гц, длительностью до 1 мсек, при номинальном напряжении с частотой посылок не более 1 в 2 мин; при напряжении ниже номинального частота повторения импульсов может быть увеличена обратно пропорционально квадрату напряжения. Фотография конденсатора КФМС 50—0,03 приведена на рис. 73, *в*.

Высокая добротность пленочных конденсаторов позволяет использовать их вместо керамических конденсаторов в высокочастотных импульсных контурах на напряжение до 50 кВ и частоту 1—2 Мгц. Значительно большая по сравнению с батареями керамических конденсаторов энергия в единице объема позволяет создавать компактные установки, практически лишенные сложных соединительных шин, необходи-

мых при использовании высоковольтных керамических конденсаторов и приводящих к значительным дополнительным потерям и увеличению индуктивности контуров.

Для установок, работающих при напряжениях 100—150 кВ, разработан малоиндуктивный высоко-

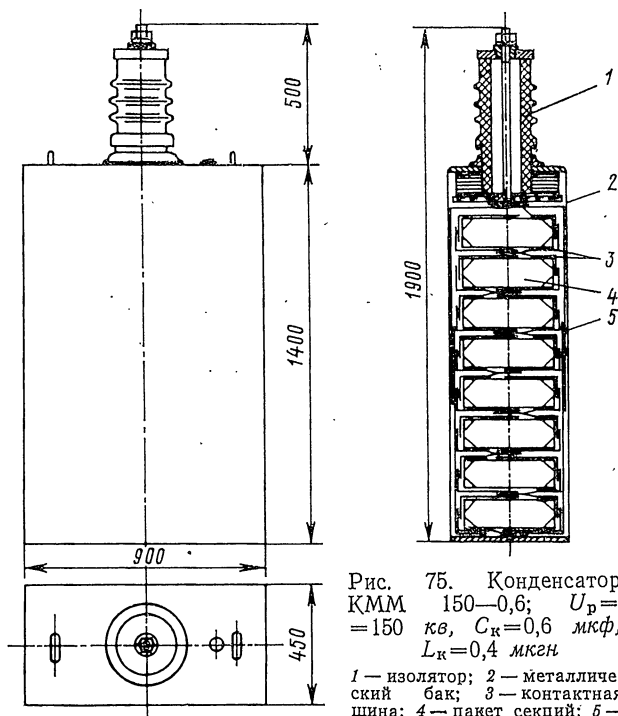


Рис. 75. Конденсатор КММ 150—0,6; $U_p = 150$ кВ, $C_k = 0,6$ мкф, $L_k = 0,4$ мкГн

1 — изолятор; 2 — металлический бак; 3 — контактная шина; 4 — пакет секций; 5 — корпусная изоляция

вольтный конденсатор КММ 150—0,6 на напряжение 150 кВ, емкостью 0,6 мкф (рис. 75). Конденсатор выполняется в металлическом корпусе с фарфоровым выводом высотой 500 мм. Для удешевления конструкции в конденсаторе использована кабельная бумага толщиной 0,08 мм с пропиткой конденсаторным маслом; рабочая напряженность принята равной 39 кВ/мм.

Высокая динамическая устойчивость конденсатора (предельный ток в разрядном режиме — 150 кА при

номинальном напряжении 150 кВ) обеспечена специальной конструкцией контактных полос, соединяющих обкладки секций, а также установкой медных шунтирующих скоб, уменьшающих плотность тока в контактных полосах. Снижение индуктивности конденсатора достигнуто главным образом за счет того,

что контактные полосы, соединяющие секции, расположены вдоль длинной стороны секции, что позволило их расширить до 600 мм. Последовательное включение групп секций выполнено так, что при разряде конденсатора, токи в соседних группах направлены встречно, что также снижает внутреннюю индуктивность конденсаторов, которая равна 0,26 мкГн.

В Харьковском политехническом институте разработан ряд типов малоиндуктивных конденсаторов, характеристики которых приведены в табл. 10 [60, 61]. Особенностью конденсаторов является то, что их выемная часть состоит из пакета плоских секций ручной сборки, соединенных па-

раллельно (см. рис. 76). При такой конструкции индуктивность всех секций, соединенных параллельно, составляет весьма небольшую величину — 0,1 нГн. Индуктивность всего конденсатора определяется подсоединением секций к выводам конденсатора и во многом зависит от расположения подсоединений в конденсаторе.

В конденсаторах КИМ-1 и КИМ-2 выводы располагаются на две стороны секции, а в КИМ-3, КИМ-4, КИМ-5 на одну (по рис. 76). В ряде конденсаторов

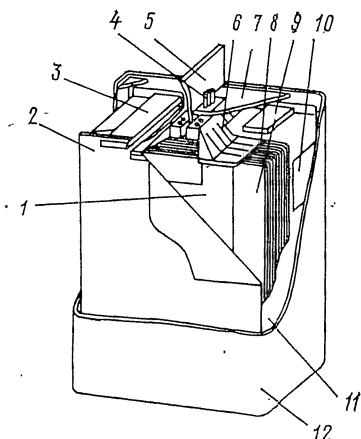


Рис. 76. Схема конденсатора группы А Харьковского политехнического института

1 — обкладка; 2 — стяжная щека; 3 — прижимная изоляционная планка; 4 — выводные контакты; 5 — изоляционный барьер; 6 — силовой ввод; 7 — крышка конденсатора; 8 — плоская секция; 9 — изоляция секции; 10 — стягивающий бандаж; 11 — изоляция от корпуса; 12 — изоляционный корпус

Импульсные конденсаторы для получения больших токов Харьковского политехнического института

Группа	Тип	$U_{p, кв}$	$C_{к, мкф}$	$W_{к, Дж}$	$L_{к, нГн}$	Габариты, мм	Масса, кг	Удельная энергия		Материал бака
								дж/дм ³	дж/кг	
А	КИМ-1	50	0,2	250	60	200×265×450	30	10,5	8,3	Винипласт
	КИМ-2	30	1,0	450	100	250×265×396	40	17,2	11,2	
	КИМ-3	50	0,2	250	20	192×232×425	26	13,2	9,6	
	КИМ-5	30	0,5	225	12	256×180×425	28	11,5	8,2	
	КИМ-6М	20	15	3 000	40	555×630×598	250	14,3	12	
	КИМС-1	50	10	12 500	30	1474×695×1020	1500	12	8,4	
	КИМ-8	5	200	2 500	10	424×600×900	300	10,9	8,3	
	КИМ-14	50	4	5 000	25	560×405×1075	350	20,5	14,3	
Б	КИМ-4	30	1,0	450	5	Ø716, H=371	135	1,5	3,3	Металл
	КИМ-6	20	15	3000	6	541×616×595	244	19,8	12,3	
	КИМ-6А	20	15	3000	15	700×668×630	300	10,2	10,0	
	КИМ-7	70	1,0	2450	25	566×421×898	190	11,4	12,9	
	КИМ-1Б	50	2,04	2550	20	800×446×570	480	12,5	5,3	
	КИМ-3Б	50	1,02	1275	10	630×536×400	192	9,45	6,65	
	КИМ-9	30	1,0	450	15	585×636×625	370	1,94	1,23	
	КИМ-12	50	1,0	1250	3	560×424×330	100	16	12,5	
В	КИМ-10	30	10	4500	10	585×636×645	370	18,8	12,3	Металл
	КИМ-13	5	350	875	15	585×636×645	370	3,65	2,36	
	КИСМ-2	20	20	4000	15	585×636×645	370	16,7	10,8	

применен один высоковольтный и два заземленных вывода секций, что приводит к уменьшению индуктивности конструкции.

Характерной особенностью этих конденсаторов является отсутствие последовательно соединенных секций, так как применение последовательного соединения в плоских пакетах секций неизбежно приводит

к резкому увеличению индуктивности. Поэтому напряжение секций равно рабочему напряжению конденсатора, что приводит к большей толщине изоляции секции, ухудшению характеристик частичных разрядов, влечет за собой уменьшение допустимой рабочей напряженности, сокращение срока службы и увеличение габаритных размеров. Это ограничивает величину рабочего напряжения конденсаторов, которое обычно не превосходит 50 кВ.

Некоторым преимуществом конструкции является возможность создания хороших контактных соединений между секциями и выводами конденсаторов и возможность повышения напряжения частичных разрядов путем создания повышенного сжатия пакетов плоских секций по сравнению с рулонными.

Это позволяет в ряде случаев получить достаточно хорошие характеристики конденсаторов с плоскими секциями (см. табл. 10).

Конденсаторы типа А (см. табл. 10) выполняются в соответствии с рис. 76. В конденсаторах типа Б для снижения индуктивности установки в конденсатор встраивается элемент разрядника (рис. 77). В конденсаторах группы В выводы осуществляются

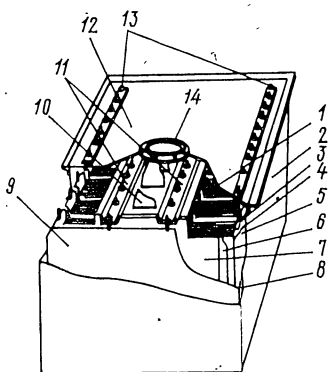


Рис. 77. Схема конденсатора группы В Харьковского политехнического института

1 — плоская секция; 2 — корпус конденсатора; 3 — низковольтный контакт; 4 — главная изоляция; 5 — система прижима низковольтных контактов; 6 — изоляция секций; 7 — обкладка; 8 — стягивающая планка; 9 — стяжная щека; 10 — высоковольтный контакт; 11 — система прижима высоковольтных контактов; 12 — изоляционная крышка; 13 — низковольтный вывод; 14 — высоковольтный электрод вакуумного разрядника

при помощи кабелей, разделки которых выполнены в корпусе конденсатора под маслом.

Ряд высоковольтных импульсных конденсаторов разработан для мощных радиотехнических устройств. К этим конденсаторам относятся типы БГКЦ и К41И-7, характеристики которых приведены в табл. 11 [62]. В конденсаторах применена бумажно-касторовая изоляция, работающая при напряженности 80—100 кВ/мм.

Таблица 11

Характеристика высоковольтных импульсных радиотехнических конденсаторов

Тип	U_p , кВ	C_k , мкф	W_k , дж	L_k , нГн	Объ- ем, см ³	Масса, кг	Удельная энергия	
							дж/дм ³	дж/кг
БГКЦ	5	2,0	25	20	450	0,85	56	29
	10	1,0	50		800	1,5	62,5	33
К41 И-7	5	100	1250	50	8500	15	147	83
	10	50	2500		17000	30	147	83

Конденсатор К41И-7 выполнен в прямоугольных стальных корпусах с двумя проходными фарфоровыми изоляторами. Секции соединены через плавкие вставки, надежно обеспечивающие отключение секции при пробое. Отключение одной секции приводит к уменьшению емкости конденсатора на 2%.

Конденсатор БГКЦ выполнен в цилиндрическом латунном корпусе с плоским малоиндуктивным изолятором. Конденсатор состоит из одной или двух последовательно соединенных секций, намотанных с выступающей фольгой.

26. Типы малоиндуктивных импульсных конденсаторов зарубежных фирм

Рядом зарубежных фирм также ведутся работы по созданию специальных малоиндуктивных конденсаторов, работающих в установках для получения больших импульсных токов.

Малоиндуктивные импульсные конденсаторы фирмы «Корнелл-Дюбиле Электрик»
(«Тоуб Дейчманн»), США

Тип конденсатора	U_p , кв	C_k , мкф	L_k , нГн	Энергия конденсатора W_k , дж	Габариты, мм	Удельная энергия, дж/дм ³	Эскиз, рисунок
ESC-247A	10*	0,05	1	2,5	Ø203; H=3,2	24	Плоский, дисковый, с коаксиальным выводом, рис. 78, а
ESC-247	10	0,1	1	5,0	Ø203; H=3,2	48	
ESC-247B	10*	0,1	1	5,0	Ø203; H=6,4	24	
ESC-261	20	0,2	1	40	Ø279; H=9,5	69	
ESC-247C	9*	0,31	1	12,5	Ø610; H=6,4	6,7	
ESC-247D	20	0,5	1	100	Ø610; H=6,4	54	Плоский, прямоугольный с коаксиальным выводом, рис. 78, б
ESC-262	25	1,6	1	500	1016×508×19	51,5	
ESC-263	12	5,0	1	500	1016×508×19	51,5	
ESC-260	10*	1,0	0,5	50	610×508×9,5	17	Плоский, прямоугольный с плоскими выводами, рис. 78, г
ESC-259A	12*	1,0	0,5	72	610×610×12,7	15	
ESC-260	20	1,0	0,5	200	610×508×9,5	68	
ESC-259	25	1,0	0,5	312	610×610×12,7	65	
ESC-257	40	0,75	10	600	Ø610; H=381	5,4	Цилиндрический, рис. 78, в
ESC-258	12	5,0	20	360	Ø260; H=254	26,7	
ESC-248A	20	15	5	3000	356×184×610	75	Прямоугольный, рис. 78, д, е
ESC-248	20	15	60	3000	356×184×610	75	
ESC-249A	120	0,1	50	720	Ø445; H=1016	4,5	Цилиндрический, рис. 80
ESC-249C	120	0,3	75	2160	Ø445; H=1016	13,5	
ESC-249	120	0,84	90	6000	Ø445; H=1016	38	
ESC-249B	120	1,0	90	7200	Ø445; H=1016	45	
ESC-250	120	0,84	30	6000	Ø610; H=762	26,7	

* Пригодны для длительной работы при большой частоте повторения импульсов.

В табл. 12 приведены характеристики конденсаторов, разработанных в США фирмой «Корнелл-Дюбиле Электрик» («Тоуб Дейчманн») [63]. Эскизы некоторых типов конденсаторов этой фирмы приведены на рис. 78.

В ряде типов конденсаторов этой фирмы, а также ряда других фирм применены секции, наматываемые

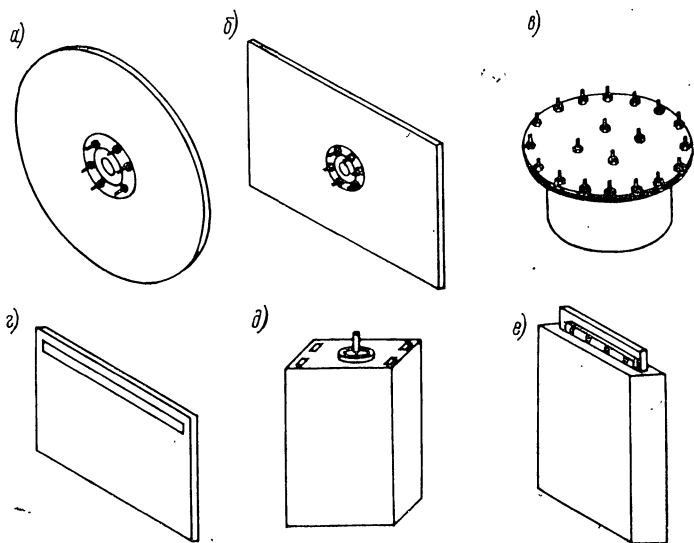


Рис. 78. Малоиндуктивные конденсаторы фирмы «Корнелл-Дюбиле Электрик» («Тоуб Дейчманн»), США, (см. табл. 12)

из бумаги большой ширины (550 мм). Каждая секция состоит из нескольких секций, соединенных последовательно. Это достигается за счет того, что на бумагу накладывается несколько рядом расположенных фольговых обкладок так, что они образуют систему последовательно соединенных емкостей (см. рис. 79). Крайние обкладки выходят на торцы секций. Это позволяет сократить габариты конденсатора при большом количестве секций, соединяемых последовательно.

Малоиндуктивные конденсаторы фирмы «Тоуб Дейчманн» США на напряжение 120 кВ, емкостью

0,8 мкф (рис. 80) применены в установке «Колумбус II» [64], состоящей из 25 конденсаторов, что обеспечивает индуктивность всей батареи менее 0,035 мкГн. Импульсные конденсаторы на 20 кВ, емкостью 15 мкф, выпускаемые этой же фирмой, используются в лаборатории военных сил США [65].

В модернизированной установке «Сциллак» [66] применен конденсатор емкостью 1,85 мкф, на напряже-

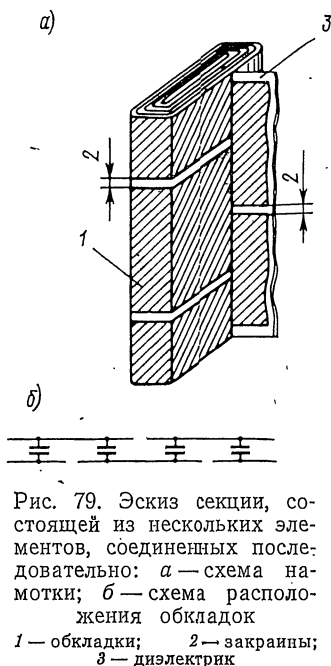


Рис. 79. Эскиз секции, состоящей из нескольких элементов, соединенных последовательно: а — схема намотки; б — схема расположения обкладок

1 — обкладки; 2 — закраины; 3 — диэлектрик

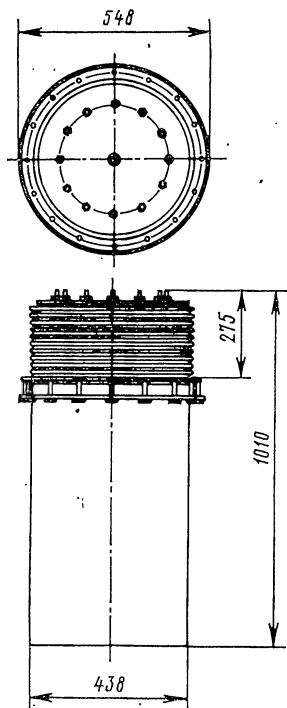


Рис. 80. Конденсатор фирмы «Корнелл-Дюбилль Электрик», США, примененный в установке «Колумбус II», $U_p = 120$ кВ; $C_K = 0,8$ мкф, $L_K = 0,12$ мкГн

ние 60 кВ (рис. 81). Конденсатор состоит из секций, выполненных по схеме рис. 79, а, причем каждая секция состоит из 8 емкостей, соединенных последовательно по схеме рис. 79, б. В конденсаторе применена рабочая напряженность 80 кВ/мм, индуктивность кон-

денсатора 24 нгн, срок службы 40 000 импульсов. Удельная энергия конденсатора составляет 52 дж/дм³. Вывод приспособлен для подсоединения к индивидуальному разряднику.

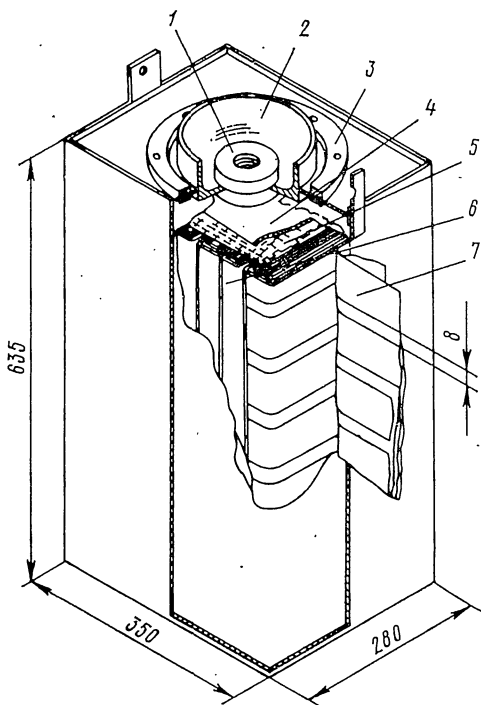


Рис. 81. Конденсатор установки «Сциллак», США

1 — центральный электрод; 2 — эпоксидный изолятор; 3 — внешний электрод; 4 — сборная шина; 5 — контакты секций; 6 — пакет; 7 — обкладка; 8 — закраина

Различные типы специальных импульсных конденсаторов выпускаются английской фирмой ВІСС («Бритиш инсультед Каллендерс кэблс»). Некоторые характеристики этих конденсаторов приведены в табл. 13, а эскизы — на рис. 82 и 83 [67].

Конденсаторы выполняются преимущественно с бумажной изоляцией, пропитанной касторовым мас-

Импульсные конденсаторы фирмы ВСС (Англия)

Тип конденсатора	U_p , кв	C_k , мкф	L_k , нгн	W_k , дж	f_p , кГц	Срок службы (число рядов) при величине U_{105p}/U_m , %			Габариты мм	Удельная энергия, дж/см ³	Рисунок
						10	50	80			
CD-11174	6	150	135	2700	35	10 ⁶	2·10 ⁵	при 70% 5·10 ⁴	502×203×465	94,3	Прямоугольный сфарфоровый выводом, рис. 82, а, б, в
CD-11843	10	34	115	1700	80	5·10 ⁵	5·10 ⁵	10 ⁵	343×127×576	68	
CD-12151	10	50	118	2500	65	5·10 ⁶	5·10 ⁵	при 70% 10 ⁵	343×254×387	74	
CD-11240	20	8,5	145	1700	160	5·10 ⁶	5·10 ⁵	10 ⁵	344×138×576	62,5	
CD-11639	25	0,1	34	31	2700	—	—	при 90% 10 ⁴	Ø114; H=171	17,8	Цилиндрический, с выводами под плоские шины, рис. 82, б
CD-11631	30	4,5	89	2000	250	5·10 ⁶	5·10 ⁵	10 ⁵	470×292×292	50	Прямоугольный, с выводами под плоские шины, рис. 82, в
CD-11197	40	1,0	100	800	500	5·10 ⁶	5·10 ⁵	10 ⁵	Ø208; H=1067	22	Цилиндрический, с коаксиальным выводом, рис. 83, а
CD-11148	100	0,5	208	2500	490	7·10 ⁵	10 ⁵	3·10 ⁴	Ø208; H=1657	44,4	Цилиндрический, с фарфоровым выводом, рис. 83, в
CD-11346	100	0,5	167	2500	550	—	10 ⁵	2·10 ⁴	Ø208; H=1786	41	Цилиндрический, с внутренним коаксиальным выводом, рис. 83, б
CD-11669	100	0,125	220	625	950	—	—	10 ³	Ø208; H=1768	10,3	Цилиндрический, с коаксиальным выводом
CD-11148	100	0,625	204	3100	440	—	при 25% 3·10 ⁶	2·10 ⁴	Ø208; H=1657	55	Цилиндрический, с фарфоровым выводом, рис. 83, в

лом. Ряд типов конденсаторов снабжен защитным приспособлением, сигнализирующим о пробое части секций. Это приспособление (рис. 84) состоит из силь-

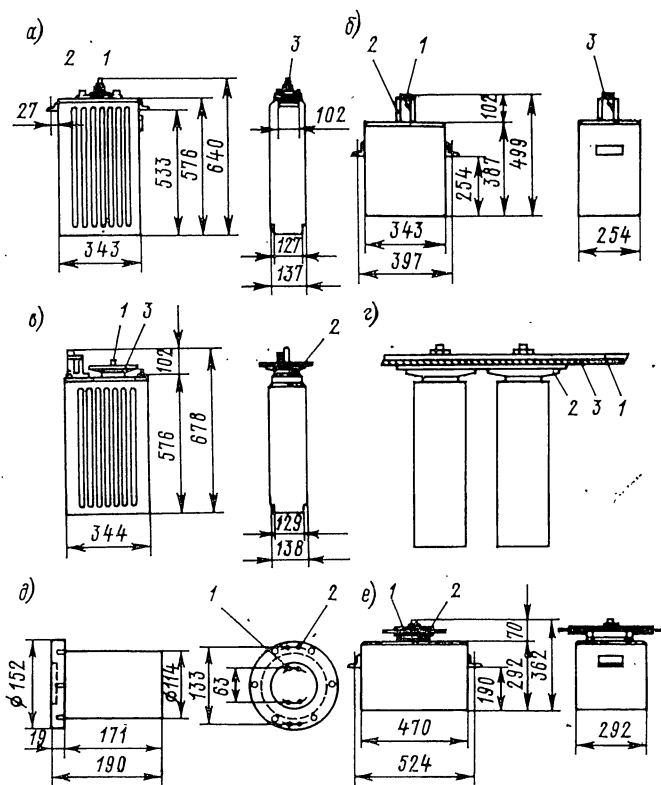


Рис. 82. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы фирмы ВСС, Англия (см. табл. 13): а — 10 кВ, 34 мкф, 1700 дж; б — 10 кВ, 50 мкф, 2500 дж; в — 20 кВ, 8,5 мкф, 1700 дж; г — параллельное соединение конденсаторов — (в); д — 25 кВ, 0,1 мкф, 31 дж; е — 30 кВ, 4,5 мкф, 2000 дж

1 — высоковольтный вывод; 2 — земляной вывод; 3 — изолятор

фона 2, реагирующего на изменение давления в конденсаторе вследствие газовыделения при пробое секции и при определенном давлении, замыкающего контакты в цепи сигнализации.

Некоторые конденсаторы имеют специальные выводы, приспособленные для малоиндуктивного присоединения к шинам (рис. 82, *г, е*) или к кабелям (рис. 83, *б, е*).

Ряд типов импульсных конденсаторов выпускается фирмой «Сангамо» США (см. табл. 14) [27]; эскизы

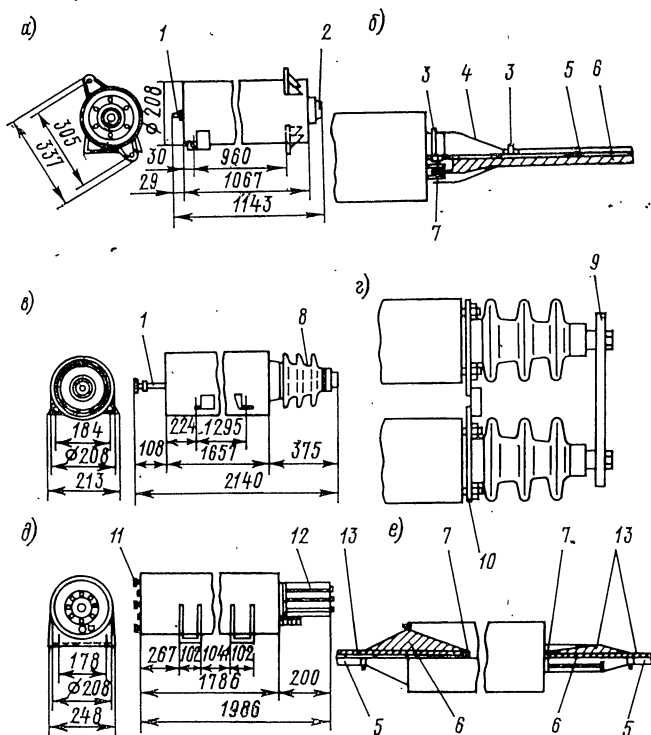


Рис. 83. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы фирмы ВСС, Англия (см. табл. 13): *а* — 40 кВ, 4 мкф, 800 дж; *б* — соединение с коаксиальным кабелем конденсатора (*а*); *в* — 100 кВ, 0,625 мкф, 3100 дж; *г* — соединение с токоведущими шинами конденсатора (*в*); *д* — 100 кВ, 0,5 мкф; 2500 дж; *е* — соединение конденсатора (*г*) с выводным и зарядным коаксиальными кабелями

1 — сигнализирующее устройство; 2 — внутренний высоковольтный вывод; 3 — контактные соединения; 4 — специальный соединительный экран; 5 — коаксиальный кабель; 6 — изоляция; 7 — центральный соединительный контакт; 8 — фарфоровый вывод; 9 — медная высоковольтная шина; 10 — медные контакты к заземленной шине; 11 — внутренний вывод; 12 — изолятор из эпоксидного компаунда; 13 — внешнее заземляющее соединение

этих конденсаторов приведены на рис. 85. Некоторые из этих конденсаторов сходны по конструкции с конденсаторами фирмы «Корнелл-Дюбилль Электрик» («Тоуб Дейчманн») США.

В США в лаборатории «Максвелл» [68] разработаны импульсные конденсаторы с номинальным напряжением от 2 до 12 кВ с энергией от 2 до 3750 дж с пленочной майларовой изоляцией, в которых применена рабочая напряженность до 200 кВ/мм. Конденсаторы обладают повышенной удельной энергией (до 480 дж/дм³), которая обеспечивается за счет снижения срока службы (около $5 \cdot 10^3$ импульсов при $U_{10бр}/U_m=0,2$ и 500 импульсов при $U_{10бр}/U_m=0,8$). Индуктивность этих конденсаторов лежит

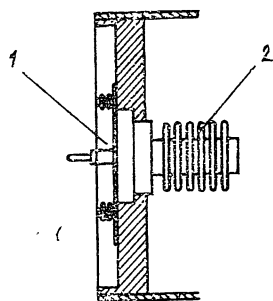


Рис. 84. Защитное приспособление, реагирующее на изменение давления в конденсаторе
1 — перемещающийся стержень, соединенный с контактной системой; 2 — сильфон

Таблица 14

Малоиндуктивные импульсные конденсаторы
фирмы «Сангамо» (США)

$U_p, \text{кв}$	$C_K, \text{мкф}$	$L_K, \text{мкн}$	$W_K, \text{дж}$	$f_p, \text{кГц}$	Габариты, мм				Удельная энергия, дж/дм^3	Рисунок
					A	B	C			
5	120	0,04	1500	72,7	184	356	394	58,2	Рис. 85, а	
10	30	0,04	1500	146	184	356	394	58,2		
20	7,5	0,04	1500	292	184	356	394	58,2		
5	240	0,04	3000	51,5	184	356	616	74,3	Рис. 85, а	
10	60	0,04	3000	102	184	356	616	74,3		
20	14	0,04	3000	212	184	356	616	74,3		
					A	B	C	D		
35	2,5	0,5	1500	142	105	343	676	171	61,5	Рис. 85, б
5	160	0,5	2000	17,7	130	343	619	83	72,5	
10	40	0,5	2000	35,5	130	343	619	83	72,5	
15	18	0,5	2000	53	130	343	619	83	72,5	
20	10	0,5	2000	71	130	343	665	127	67,3	
35	3,25	0,5	2000	127	130	343	676	171	66,3	Рис. 85, в Рис. 85, г Рис. 80
25	0,5	0,015	150	1680	$\varnothing = 102; H = 470$				39	
50	2,0	0,015	2500	920	$356 \times 279 \times 677$				37	
120	0,8	0,1	6000	562	$\varnothing = 445; H = 1016$				38	

в пределах от $5 \cdot 10^{-9}$ до $10 \cdot 10^{-9}$ гн. Характеристики некоторых типов приведены в табл. 15, а эскиз — на рис. 86.

Немецкими фирмами разработаны различные типы малоиндуктивных конденсаторов. В табл. 16 при-

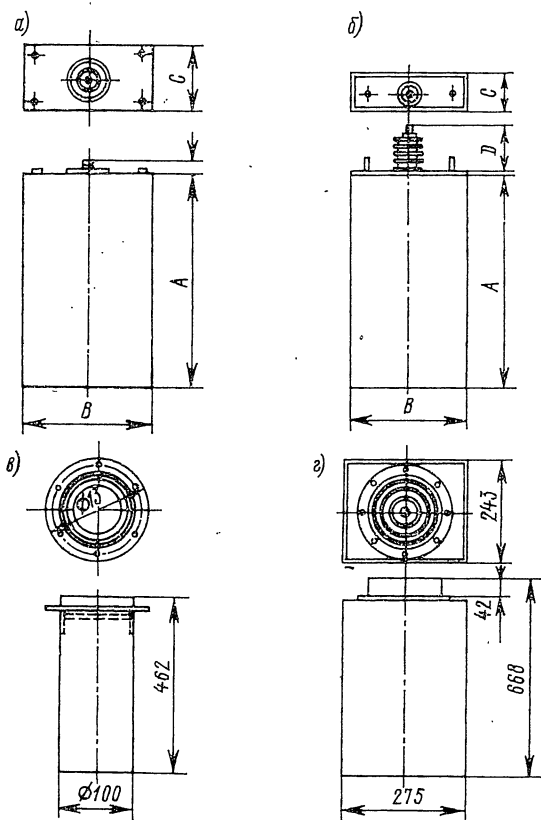


Рис. 85. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы фирмы «Сангамо» (см. табл. 14).

ведены характеристики некоторых типов конденсаторов фирмы «Сименс» в металлических корпусах [69]. Конденсаторы имеют бумажную изоляцию, пропитанную хлорированными жидкостями или касторовым

маслом. Конденсатор универсального типа А с фарфоровым выводом пригоден для работы при постоянном и переменном напряжении и в импульсном режиме. Он может быть использован также для генераторов импульсных напряжений. Конденсаторы типа В—Е имеют малую собственную индуктивность и рассчитаны на большие импульсные токи. Конструкция выводов этих конденсаторов показана на рис. 87. Выполнение выводов в виде коаксиала позволяет осуществлять присоединение плоских шин или коаксиальных кабелей. Для случая разряда с ограниченными токами эти же конденсаторы могут оснащаться такими же выводами, как и конденсаторы типа А (табл. 17, типы F—J). Конденсаторы С и D имеют специальное исполнение. Конденсатор С разряжается через специальный разрядник, расположенный непосредственно на корпусе конденсатора. Конденсатор D имеет два параллельных

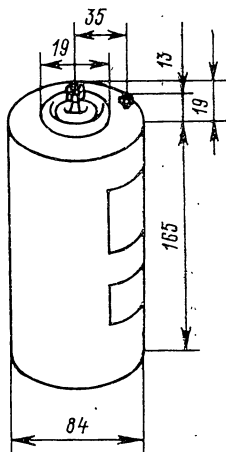


Рис. 86. Малоиндуктивный конденсатор фирмы «Максвелл», США, тип 5C35LN, $U_p=5$ кв, $C_k=35$ мкф

Таблица 15

Малоиндуктивные импульсные конденсаторы
фирмы «Максвелл» (США)

Тип конденсатора	U_p , кв	C_k , мкф	L_k , нгн	W_k , джс	Габариты, мм	Масса, кг	Удельная энергия	
							джс/дм ³	джс/кг
5C35LN	5	35	5—10	437	∅ 84; H = 165	1,58	480	277
6D32LN	6	32	5—10	575	∅ 101,5; H = 165	2,26	405	238
12E4LN	12	4	5—10	290	∅ 101,5; H = 165	2,26	218	129
5E110HD-A	5	110	16	1370	∅ 178; H = 432	18,1	127	76
10E55HQ-A	10	55	19	2740	∅ 178; H = 737	30,4	149	90
30E8,3HR-A	30	8,3	22	3750	∅ 178; H = 1041	43	144	87

Импульсные конденсаторы фирмы «Сименс» (ФРГ)

Тип конденсатора	U_p , кВ	L_k , нГн	W_k , дж	Допустимый разряд- ный ток при напря- жении		Габариты, мм	Масса, кг	Удельная энергия	
				I_m , кА	U_p , кВ			дж/дм ³	дж/кг
Конденсаторы в металлическом корпусе									
Для больших разрядных токов	5-50	200-230	320	50	25	92 × 122 × 392	11	73	29
	5-30	25-60	1 400	25	50	320 × 134 × 350	33	93	42
	5-50	30-50	3 000	150	40	320 × 284 × 363	65	91	46
	5-30	40-70	2 100	100	50	354 × 134 × 462	46	95	46
	30-50	50	2 100	200	30	354 × 134 × 462	46	95	46
Для ограниченных разрядных токов	5-30	200-300	1 400	50	50	320 × 134 × 374	33	87	42
	50	300	1 400	20	50	345 × 100 × 452	33	87	42
	5-50	230-600	2 100	50	50	354 × 134 × 462	45	95	47
	5-50	500-1000	2 200	10	50	345 × 100 × 690	50	92	44
	5-50	250-800	4 000	50	50	354 × 134 × 862	86	97	46
Цилиндрические конденсаторы в изолирующем корпусе									
К	300	2000-3000	1 400	20	300	∅ 210; H = 1040	85	11	4,7
Л	300	1000-2000	5 000	70	300	∅ 500; H = 1020	400	25	12,5
М	300	1000-2000	20 000	140	300	∅ 880; H = 1020	1200	32	16,6
Н	500	3000-5000	6 000	60	500	∅ 510; H = 2540	870	10	6,9

вывода. Один из них служит для присоединения нагрузки, а второй служит для закорачивания конденсатора накоротко (кроссбар).

Приведенные в табл. 17 характеристики конденсаторов соответствуют сроку службы 10^4 импульсов при частоте колебательного разряда порядка 100 кгц и $U_{10\text{бр}}/U_m = 0,8$. При этом частота следования импульсов не должна превышать двух импульсов в минуту. При более сильном затухании и кратковременной работе конденсатора допустимо соответственное увеличение частоты следования импульсов.

Напряженности поля в этих импульсных конденсаторах в зависимости от условий эксплуатации колеблются от 30-до 100 кв/мм . Допустимая внутренняя температура конденсатора при применении хлорированной пропитки равна от -25 до $+80^\circ \text{C}$, а при применении касторового масла — от $+10$ до $+60^\circ \text{C}$.

Для создания малоиндуктивной батареи конденсаторов на высокие напряжения порядка мегавольт в [70] предлагается собирать батарею конденсаторов из нескольких этажей; каждый этаж образуется параллельным соединением нескольких элементарных модулей, расположенных концентрически по отношению к оси симметрии. Каждый элементарный модуль содержит несколько цепочек, в которых конденсаторы соединены последовательно, причем высота модуля приблизительно равна высоте конденсатора. Конденсаторы, выполненные с выступающей фольгой (см. рис. 39, б),

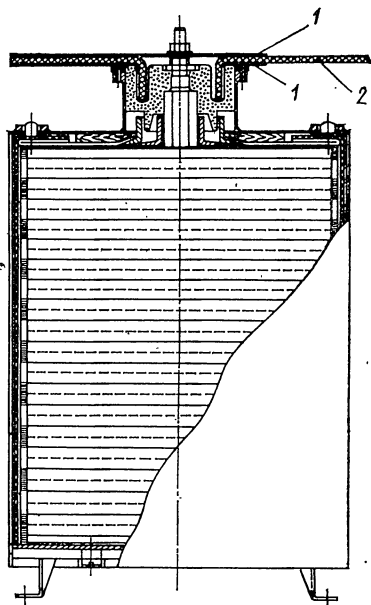


Рис. 87. Конденсатор типа Е фирмы «Сименс», ФРГ

1 — контактная шина; 2 — изоляция

соединяются попарно так, чтобы токи в них протекали встречно (рис. 88). Концы линий присоединяются к пластинам, расположенным на торцах модуля. Конденсаторы в модуле расположены между двумя цилиндрическими стенками, свободное пространство между которыми залито эпоксидным компаундом. Несколько модулей располагаются в виде одного этажа, а из таких этажей, поставленных один на другой, собирается батарея.

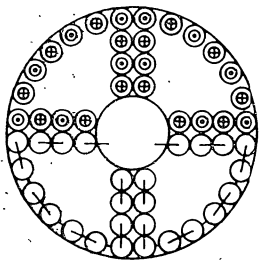


Рис. 88. Расположение в плане конденсаторов, составляющих один модуль батареи (в модуле 4 цепочки конденсаторов)

Точками и крестиками показано направление протекания тока

Последовательное соединение этажей осуществляется при помощи разрядников, размещенных между этажами. При напряжении одного этажа 200 кВ и 10 этажах установка имеет на выходе 2 МВ.

По данным [71] весьма малую индуктивность конденсатора можно получить, применяя цилиндрическую форму конденсатора с разрядником в середине, согласно рис. 89. Для конденсатора 10 кВ, емкостью 0,1 мкФ можно обеспечить индуктивность $10 \cdot 10^{-9}$ Гн, что дает частоту колебаний при разряде порядка $(3-5) \cdot 10^6$ Гц.

27. Типы импульсных конденсаторов, не обладающих малой индуктивностью

Для ряда высоковольтных импульсных установок индуктивность разрядного контура не определяется характеристиками конденсатора и зависит главным образом от параметров нагрузки, а также от индуктивности схемы соединения конденсаторов в установке и проводников, соединяющих установку с нагрузкой. К таким установкам относятся: генераторы импульсных напряжений (ГИН) для высоковольтных испытаний

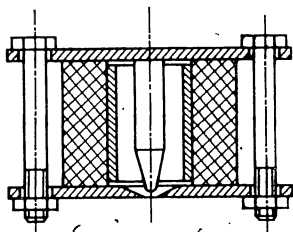


Рис. 89. Схема цилиндрического конденсатора с разрядником в середине

изоляция аппаратов и линий высокого напряжения, работающих в электропередачах переменного тока промышленной частоты и в электропередачах постоянного тока; синтетические схемы для испытания коммутационной аппаратуры на разрывную мощность; генераторы импульсных токов (ГИТ), работающие на нагрузку с большим индуктивным или активным сопротивлением (например, ГИТ для испытания искровых промежутков или нелинейных сопротивлений вентильных разрядников).

К импульсным конденсаторам, работающим в этих установках, обычно не предъявляются особые требования с точки зрения их малой индуктивности. Кроме того, в импульсных установках всех типов, использующих конденсаторы с номинальным напряжением 150 кВ и выше, индуктивность узла подсоединения конденсатора в основном определяется индуктивностью вывода, конструкцией и расположением шин, обеспечивающих протекание прямого и обратного токов. В этом случае также внутренняя индуктивность не определяет индуктивность всей установки.

При номинальных напряжениях выше 100 кВ в конденсаторах с металлическим баком напряженность электрического поля в главной изоляции с учетом неравномерности поля на углах пакета секций становится соизмеримой с рабочей напряженностью в главной изоляции. Усиление поля на краю фольги возникает в секциях, имеющих наибольший потенциал относительно корпуса и расположенных вблизи заземленных стенок бака.

Для уменьшения влияния поля в главной изоляции применяется экранирование секций конденсатора, имеющих наиболее высокий потенциал относительно корпуса. В конденсаторах, имеющих один вывод на корпусе, обычно ставится один экран, имеющий половинный потенциал относительно корпуса и охватывающий половину секций с большим потенциалом (рис. 90). В ряде случаев при более высоких напряжениях конденсатора можно применять и большее количество экранов, принудительно распределяющих напряжение в изоляции пакетов секций относительно корпуса.

К подобному же эффекту приводит применение в конденсаторах двух выводов и присоединение корпуса конденсатора к точке, соответствующей половинному напряжению конденсаторов. При заземлении одного из выводов корпус конденсатора при этом должен быть изолирован от земли на половинное напряжение конденсатора. В конденсаторах с номинальным напряжением 100 кВ и выше эти мероприятия приводят к существенному увеличению сроков службы изоляции конденсатора.

В конденсаторах на напряжение 150 кВ и выше усложняется проблема конструкции высоковольтного вывода вследствие весьма неравномерного распределения напряжения по поверхности (см. § 12).

В импульсных конденсаторах на напряжение свыше 200 кВ вывод приемлемых размеров для конденсатора в металлическом корпусе можно осуществить, лишь применяя специальные меры по распределению напряжения (например, конденсаторные обкладки). Ввиду значительной сложности изготовления таких выводов, конденсаторы на напряжение свыше 200 кВ целесообразно

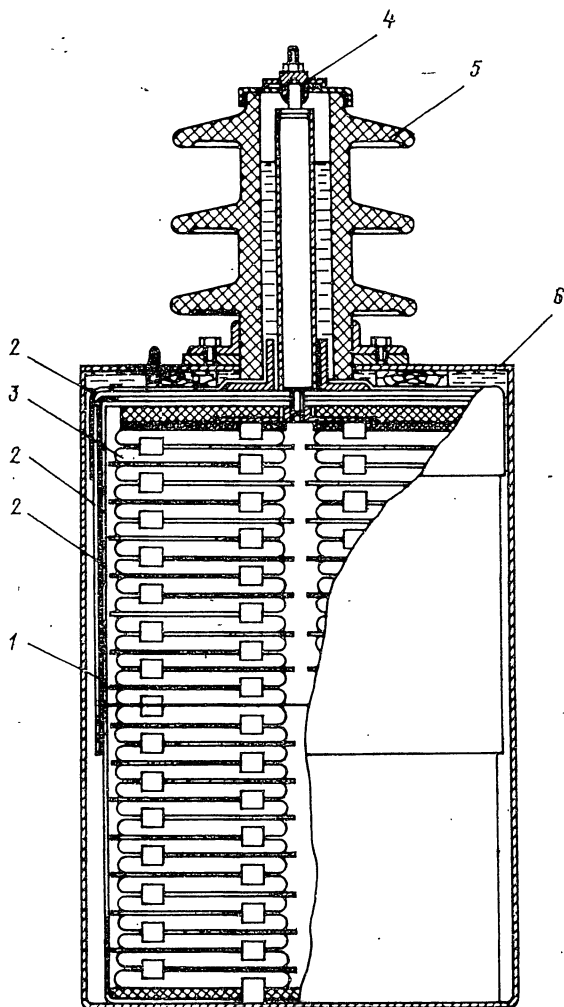


Рис. 90. Расположение экрана в высоковольтных конденсаторах
 1 — экран; 2 — главная изоляция; 3 — секция; 4 — высоковольтный вывод;
 5 — изолятор; 6 — бак

изготавливать в изолирующем корпусе. Индуктивность таких конденсаторов обычно равна 0,5—1,5 мкГн и определяется в основном расположением проводников, соединяющих конденсатор с другими элементами установки.

Предварительные расчеты показывают, что индуктивность батареи конденсаторов вместе с соединяющими шинами получается при этом примерно такой же, как и в случае применения конденсаторов в металлическом корпусе со сложным выводом.

В табл. 17 приведены основные данные подобных импульсных конденсаторов. Внешний вид конденсаторов в корпусах из бакелитовых цилиндров приведен на рис. 91.

Одним из наиболее крупных конденсаторов для генераторов импульсных напряжений является конденсатор ИМ 300-0,35, выпущенный заводом «Конденсатор», на номинальное напряжение 300 кВ, емкостью 0,35 мкФ с энергией 16,2 кДж. Конденсатор предназначен для работы в режиме разряда на сопротивление не менее 50 Ом, с частотой следования 1 импульс в минуту. Срок службы равен 10^4 импульсов. Конденсатор выполнен с бумажно-масляной изоляцией при рабочей напряженности 52 кВ/мм. Толщина диэлектрика секции $d_c = 8 \cdot 0,012 = 0,096$ мм.

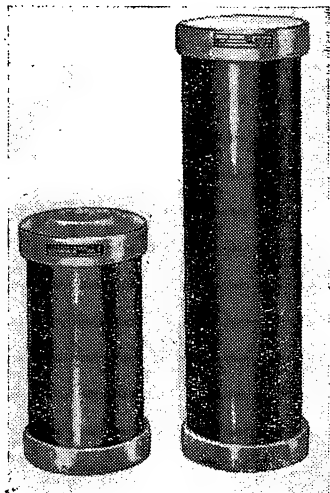


Рис. 91. Внешний вид конденсаторов в корпусах из бакелитовых цилиндров

[Таблица 17]

Импульсные высоковольтные конденсаторы изготовления завода «Конденсатор»

Тип конденсатора	U_p , кВ	C_k , мкФ	Габариты, мм	Удельная энергия, Дж/дм ³	Примечание
ИМ 300-0,35	300	0,35	∅ 1350; H = 1076	18,2	В изолирующих цилиндрах
ИМ 150-08	150	0,8	∅ 1050; H = 770	15	
ИМ 110-0,011	110	0,011	∅ 161; H = 515	6,4	
ИМ 110-0,022	110	0,022	∅ 207; H = 650	6,1	
ИМ 60-0,03	60	0,03	∅ 161; H = 515	5,2	
ИМ 40-0,03	40	0,03	∅ 161; H = 395	3,0	В полиамидном корпусе
ИМН 100-0,1	100	0,1	455 × 150 × 326	22,0	

Общий вид конденсатора изображен на рис. 92. Конденсатор выполнен в фарфоровом цилиндре, выводами являются верхняя и нижняя металлические крышки. Верхняя крышка имеет упругую мембрану, служащую для компенсации расширения масла.

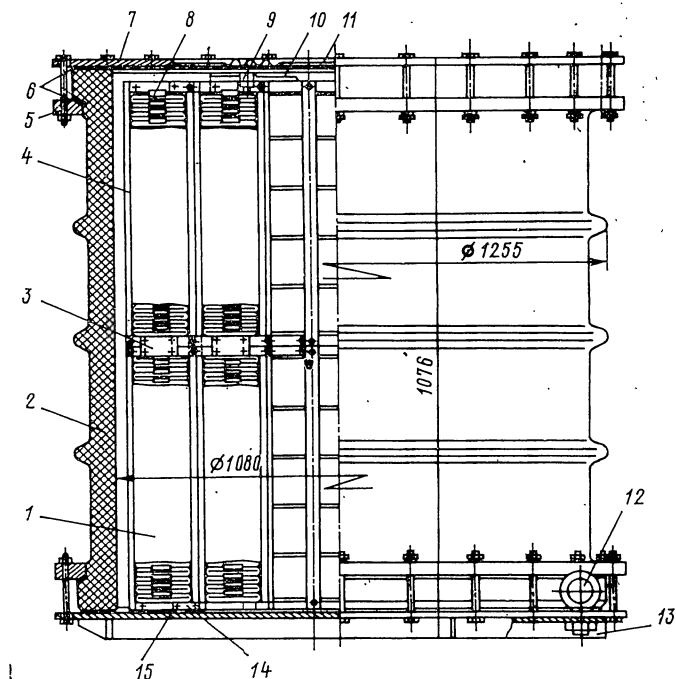


Рис. 92. Общий вид конденсатора ИМ 300—0,35

1 — пакет секций; 2 — изоляционный цилиндр; 3 — стальная соединительная планка; 4 — текстолитовая соединительная планка; 5 — стальное кольцо; 6 — резиновое уплотнение; 7 — верхняя крышка; 8 — перемычка из медной ленты; 9 — шпилька с гайкой; 10 — медная лента; 11 — упругая мембрана; 12 — рымболт; 13 — стальная балка; 14 — стяжная щека; 15 — днище

Масса конденсатора равна примерно 2000 кг. Его удельная энергия составляет 8,1 дж/кг или 12 дж/дм³. Относительно низкие удельные характеристики определяются тем, что внутренний объем конденсатора заполнен активными материалами только на 39%.

28. Импульсные конденсаторы с металлизированным диэлектриком

Весьма перспективным путем улучшения удельных характеристик конденсаторов, работающих в импульсном режиме, является применение обкладок из тонкого слоя металла, чаще всего

из цинка, толщиной менее 0,1 мм, нанесенного на ленту диэлектрика испарением металла в вакууме.

При этом в качестве диэлектрика могут быть применены как бумага, пропитанная жидким диэлектриком, так и синтетическая изоляционная пленка.

Слой металла в ряде случаев наносится с одной стороны до края бумаги (аналогично секциям с выступающей фольгой). Края цинкового покрытия соединяются вместе при помощи специальных контактов, наносимых методом шоопирования.

Основное снижение объема и веса металлобумажных конденсаторов происходит за счет того, что применение в качестве обкладок тонкого слоя металла позволяет существенно повысить рабочую напряженность, особенно при использовании тонкослойного диэлектрика (в 1—3 слоя). В этом случае существенно возрастают напряженности частичных разрядов за счет малой толщины диэлектрика, см. формулы (25), (26).

В обычных конденсаторах в области малых толщин допустимые рабочие напряженности ограничиваются кратковременной электрической прочностью, которая существенно падает при малых толщинах диэлектрика (см. рис. 12). В металлобумажных конденсаторах при пробое диэлектрика в слабом месте во время тренировки или во время работы обкладка вокруг места пробоя оплавляется и испаряется, в результате чего дефектное место оказывается изолированным и электрические свойства конденсатора восстанавливаются.

Дополнительное снижение объема и веса металлобумажных конденсаторов по сравнению с конденсаторами с фольговыми обкладками при прочих равных условиях происходит за счет сокращения объема и веса самих обкладок.

Улучшение характеристик металлобумажных конденсаторов возможно за счет замены пропитанного бумажного диэлектрика синтетической пленкой или пленочно-бумажной изоляцией. Как указывалось в гл. 2, бумага содержит большое количество токопроводящих частиц, что препятствует повышению рабочей напряженности в тонком диэлектрике. В то же время пленка практически не содержит токопроводящих частиц, что позволяет повысить рабочую напряженность в пленочных и пленочно-бумажных конденсаторах.

Вследствие малой толщины металла в обкладках неизбежны большое активное сопротивление и значительная потеря энергии в конденсаторе с металлизированными обкладками. Возможным препятствием для использования этих конденсаторов в импульсном режиме может явиться разрушение тонкого металлического слоя из-за прохождения больших токов, особенно в зоне контакта. В этом случае иногда применяют утолщение слоя металла у края обкладки, сохраняя малую толщину на основной площади для обеспечения хорошего самовосстановления.

В конденсаторах высокого напряжения с металлизированным диэлектриком необходимо предусматривать ряд мероприятий для уменьшения плотности тока в месте подвода электрического напряжения к секциям. Одним из способов уменьшения плотности тока является увеличение площади контактирующих накладок, размещаемых на торцах секций.

Другой способ заключается в создании на металлизированной бумаге в слое металлизации специального рисунка из изолирующих полос, которые делят металл обкладки на ряд участков, соединенных параллельно. Изолирующие полосы можно создавать путем выжигания определенных участков слоя металла. Этот способ приводит, однако, к некоторому увеличению активного сопротивления обкладки, которое и без этих мероприятий относительно большое.

Количество пробоев, при которых металлобумажные конденсаторы восстанавливают электрическую прочность, зависит от энергии, выделяющейся в момент пробоя диэлектрика. Если в момент пробоя выделяется малое количество энергии, то восстановление электрической прочности происходит без разрушения бумаги и вероятность выхода из строя конденсатора уменьшается. Поэтому в таких случаях допускается большее количество пробоев. Если энергия достаточно большая, то в процессе оплавления обкладок возможно также обугливание бумаги, что приведет к устойчивому короткому замыканию и выходу конденсатора из строя.

Энергия, выделяющаяся в момент пробоя диэлектрика, возрастает с ростом толщины диэлектрика и с повышением напряжения на конденсаторе. Например, при напряженности 200 кВ/мм в конденсаторе с четырьмя слоями бумаги выделяется энергия порядка 1 дж, с пятью — 3 дж, с шестью — около 10 дж, с семью — около 20 дж.

Возможность повреждения бумаги и отказ в восстановлении электрической прочности при больших энергиях, выделяющихся при пробое, затрудняет создание металлобумажных конденсаторов с большой толщиной диэлектрика между обкладками (более трех листов бумаги) и ограничивает рабочие напряжения конденсаторов.

В процессе многократных пробоев с восстановлением электрической прочности обгорание обкладок приводит к уменьшению емкости конденсатора. Обычно считается недопустимым уменьшение емкости конденсатора более чем на 10%.

Многократные пробой с восстановлением электрической прочности приводят также к снижению сопротивления изоляции конденсатора, что при большом количестве конденсаторов в установке может затруднить процесс зарядки.

Ряд фирм, в том числе западногерманская фирма «Роберт Бош» (Штутгарт), начали выпускать импульсные металлобумажные малоиндуктивные конденсаторы на большие импульсные токи [72]. Такие конденсаторы используются в термоядерных лабораториях в Аахене и Сакле.

29. Конденсаторы с индивидуальными разрядниками

В ряде случаев для уменьшения индуктивности установки, состоящей из большого количества импульсных конденсаторов, соединенных параллельно, каждый из конденсаторов снабжается индивидуальным разрядником. Разрядники имеют специальные

дополнительные электроды, на которые подается поджигающий импульс, обеспечивающий синхронное параллельное срабатывание разрядников.

Разрядники, применяемые для коммутации конденсаторов в батарее, бывают трех типов: вакуумные, атмосферного давления или высокого давления [38]. Эти разрядники должны удовлетворять следующим требованиям:

а) выдерживать без самопроизвольных пробоев и перекрытий рабочее напряжение установок;

б) иметь относительно малую индуктивность по сравнению с индуктивностью конденсатора, соединительных шин или кабелей и нагрузки;

в) обладать необходимой точностью срабатывания (порядка 10^{-8} — 10^{-9} сек) и малым разбросом времен срабатывания (не более 0,2—0,3 мксек);

г) обладать относительно малым сопротивлением с тем, чтобы потери энергии в разряднике были не больше потерь в конденсаторе;

д) обладать достаточно высокой долговечностью (порядка 10^3 — 10^4 включений).

Простейший вакуумный разрядник представляет собой цилиндрическую камеру из изолирующего материала с металлическими торцевыми фланцами—электродами (см. рис. 66). Разрядник часто размещается на крышке конденсатора, причем один из электродов одновременно является выводом конденсатора. Иногда рабочий промежуток разбивается на несколько отдельных изолированных друг от друга промежутков. В качестве изоляционного материала используется фарфор, стекло, оргстекло, полиэтилен, фторопласт и т. п. Материалом для электродов служат металлы с высокой температурой испарения.

Основными преимуществами вакуумных разрядников являются малая собственная индуктивность, большая пропускная способность по току, бесшумность действия. Разрядники не требуют механической регулировки при изменении рабочего напряжения в определенных пределах. Рабочее напряжение разрядников колеблется от 100—300 в до 150 кВ; коммутлируемые токи могут значительно превышать 500 кА. Предразрядное давление газа внутри рабочего объема разрядника может меняться от 10^{-7} до 0,1 мм рт. ст. Необходимость обеспечения вакуума усложняет конструкцию, однако, прочие преимущества и относительно большая устойчивость работы послужили причиной их применения в установках.

Срабатывание разрядника чаще всего вызывается искровым поджигом путем подачи импульса с крутым фронтом от специального импульсного генератора на поджигающий электрод.

Искровые разрядники при атмосферном давлении чаще всего используются тригатронного типа (рис. 93). В этом случае трехэлектродный разрядник имеет два основных и один управляющий электрод. На управляющий электрод от специального импульсного генератора подается поджигающий импульс, который вызывает пробой сначала между управляющим и ближайшим к нему основным электродом, а затем и между основными электродами. Конденсаторы с индивидуальными тригатронными раз-

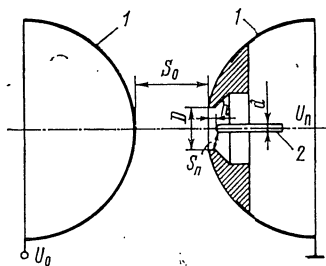


Рис. 93. Схема тригatronа
 1 — основные электроды; 2 — управляющий электрод; S_0 — главный разрядный промежуток; S_p — поджигающий промежуток; D — диаметр отверстия; d и h — диаметр и заглубление управляющего электрода

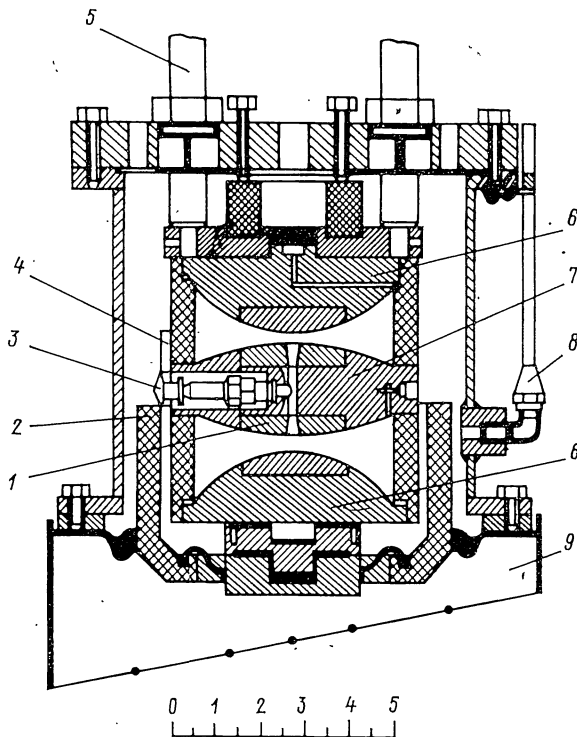


Рис. 94. Разрядник и вывод высоковольтного полюса конденсатора установки «Сцилла IV»

1 — вкладыш из вольфрамового сплава; 2 — изолятор; 3 — стержневой электрод; 4 — вход поджигающего импульса; 5 — коаксиальный кабель; 6 — основные электроды; 7 — средний электрод; 8 — индикатор уровня масла; 9 — конденсатор

рядниками на 30 кВ, смонтированными на выводах, были использованы в установке «Мэгги» [73].

В ряде случаев применяются также каскадные разрядники, в процессе срабатывания которых происходит последовательный пробой искровых промежутков разрядника.

На рис. 94 приведен каскадный разрядник, сочлененный с импульсным конденсатором [74]. Конденсатор выполнен на номинальное напряжение 50 кВ, емкостью 2 мкФ и имеет индуктивность 15 нГн. Разрядник также рассчитан на рабочее напряжение 50 кВ. Для уменьшения индуктивности высоковольтный вывод конденсатора и разрядник погружены в масло. Разрядник состоит из двух основных электродов 6 и одного среднего электрода 7, внутри которого находится дополнительный поджигающий стержневой электрод 3. Поджигающий импульс напряжения подводится к электроду 3 и вызывает пробой промежутка между электродами 7 и 3.

После пробоя подсвечивающего промежутка на электрод 7 попадает высоковольтный поджигающий импульс.

Конструкция промежуточного электрода обеспечивает одновременную подсветку (вызывающую фотоионизацию) обоих искровых промежутков. Разброс запаздывания разрядника при рабочем напряжении 50 кВ и поджигающем импульсе такой же величины был около 0,01 мксек.

Общая индуктивность конденсатора и разрядника не превосходит 50 нГн.

В разрядниках высокого давления наряду со сжатым воздухом часто используются и другие (в том числе высокопрочные) газы: азот, элегаз, фреон. Высокая электрическая прочность газа при повышенном давлении позволяет работать с малыми межэлектродными промежутками. Разрядники со сжатым газом достаточно бесшумны в работе, требуют значительно меньше времени для подготовки к работе и сравнительно просты в эксплуатации. Разрядники имеют широкий ($0,15-1,0 U_p$) диапазон управления по напряжению без регулировки длины искровых промежутков.

Наиболее широко распространены разрядники высокого давления с тригatronным поджигом. Величины избыточных давлений обычно составляют 10—20 ат.

30. Импульсные конденсаторы в виде полосковых линий

Для формирования мощных наносекундных импульсов напряжения с амплитудой в миллионы вольт и мощностью в тысячи гигаВольт-ампер широко используется система последовательно включенных формирующих линий.

В ряде случаев в качестве формирующих полосковых линий используются конденсаторы с протяженными электродами, которые в области наносекундных времен представляют собой линии с распределенными параметрами.

Одна из возможных схем генератора с последовательным включением полосковых линий приведена на рис. 95 [75]. В за-

рядном режиме разрядники P разомкнуты и линии заряжаются до напряжения U (как это показано на рис. 95 стрелками) при $t=0$. При этом напряжение на нагрузке R_H отсутствует. При одновременном срабатывании разрядников P по активным участкам линий (1, 3, 5) в сторону нагрузки от места присоединения разрядника со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{л.уд}} C_{\text{л.уд}}}}$$

распространяется падающая волна напряжения $u_{\text{п}} = -U$ и соответствующая волна тока $i_{\text{п}} = U/Z$, где $Z = \sqrt{L_{\text{л.уд}}/C_{\text{л.уд}}}$ — волновое сопротивление полосковой линии, $L_{\text{л.уд}}$ — индуктивность линии на единицу длины, $C_{\text{л.уд}}$ — емкость линии на единицу длины.

Если линия имеет длину l , то в момент времени $\tau = l/v$ падающие волны достигают противоположного конца линий, что при-

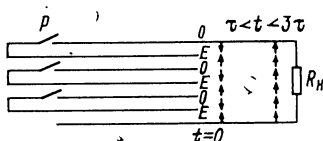


Рис. 95. Генератор с последовательным включением полосковых линий

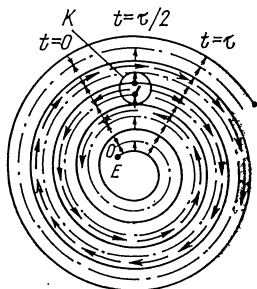


Рис. 96. Полосковая линия, свернутая в спираль

водит к последовательному соединению всех n линий (см. рис. 95, стрелка при $\tau < t < 3\tau$).

При этом на нагрузке R_H напряжение

$$U_H = nU \frac{R_H}{nz + R_H} \quad (225)$$

Длительность импульса t_H равна времени двойного пробега волны по линии

$$t_H = 2\tau = \frac{2l \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}}{c}, \quad (226)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика линии; c — скорость света.

Для полосковой линии

$$z = 120\pi \frac{d}{\sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} (b+d)}, \quad (227)$$

где d — толщина изоляции между полосовыми электродами; b — ширина полосовых электродов.

Если свернуть полосковую линию длиной $2l$ в спираль с числом витков n , зарядить до напряжения U и затем замкнуть на длине l (см. рис. 96), то в обе стороны от разрядника P начнут распространяться падающие волны. Когда падающие волны достигают концов спирали, напряжение между началом и концом спирали возрастает до величины nU .

Когда отраженные волны достигают разрядника, процесс перезарядки активной линии оканчивается, и напряжение на выходе (между началом и концом спирали) в случае $R_n \gg nZ$ достигает максимальной величины $2nU$. Далее процесс отражения волн повторяется до тех пор, пока вся энергия не поглотится в нагрузке или не уйдет на потери.

Время, за которое напряжение нарастает до максимума,

$$\tau = \frac{\pi n D \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}}{c}, \quad (228)$$

где n — число витков спирали; D — средний диаметр.

Выходное напряжение в интервале $0 < t < \tau_1$

$$u_{\text{вых}}(t) = 2 \frac{t}{\tau_1} U, \quad (229)$$

где τ_1 — среднее время прохождения волной витка.

При $\tau < t < 2\tau$

$$u_{\text{вых}}(t) = 2 \left(n - \frac{t - \tau}{\tau_1} \right) U. \quad (230)$$

Выходная емкость такого спирального генератора при близких внутреннем и внешнем диаметрах

$$C_{\text{вых}} \approx C/n^2, \quad (231)$$

где C — полная емкость линии, свернутой спиралью.

Для создания таких генераторов, состоящих из конденсаторов с плоскими протяженными электродами, в качестве изоляции используются синтетические пленочные диэлектрики и эпоксидные компаунды.

31. Импульсные конденсаторы с жидким или газообразным диэлектриком

В последнее время в технике больших импульсных токов стали применяться импульсные конденсаторы или формирующие линии с жидким и газообразным диэлектриком на протяжении 10^6 — 10^7 в. Эти конденсаторы или формирующие линии используются для создания мощных импульсов тока до 10^5 — 10^6 а при напряжениях до 10^6 — 10^7 в. Длительность импульсов тока составляет десятки наносекунд.

В связи с тем, что энергия, запасаемая в линии, должна составлять порядка 10^5 — 10^6 дж, для сокращения размеров конденсаторов и линии часто используется импульсная зарядка емкости

линии от импульсного генератора. Это позволяет существенно увеличить допустимые рабочие напряженности в жидком диэлектрике за счет кратковременности воздействия напряжения.

Одна из возможных принципиальных схем такого устройства приведена на рис. 97. В этом случае линия, представляющая собой систему коаксиальных цилиндров, между которыми находится жидкий диэлектрик или газ под давлением, заряжается за время порядка 1 мксек от генератора импульсных напряжений. В процессе заряда большая часть энергии, запасенной в емкостях импульсного генератора, переходит в емкость линии. Затем линия разряжается на нагрузку, обеспечивая требуемый импульс тока в нагрузочном сопротивлении.

Чем быстрее будет осуществляться зарядка емкости линии, тем выше может быть принята допустимая напряженность в диэлектрике линии.

Скорость зарядки линии определяется емкостью генератора в разрядном режиме C_r , емкостью линии $C_{\text{л}}$ и индуктивностью

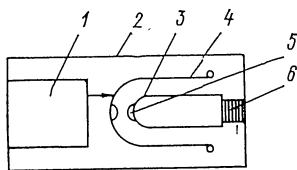


Рис. 97. Принципиальная схема генератора мощных наносекундных импульсов тока

1 — ГИН (по схеме Аркадьева-Маркса); 2 — металлический бак; 3 — внутренний цилиндр линии Блюмлейна; 4 — промежуточный цилиндр линии Блюмлейна; 5 — разрядник; 6 — нагрузка

всего контура L_0 . Так как емкость импульсного генератора и емкость линии (близкая по величине емкости C_r) обычно определяются необходимой энергией, то основной путь сокращения времени заряда емкости линии заключается в уменьшении величины L_0 . Для этого импульсный генератор выполняется из малоиндуктивных конденсаторов и помещается в металлический цилиндр, заполненный жидким диэлектриком или газом под давлением с минимально допустимым расстоянием между конденсаторами и цилиндром.

В качестве жидких диэлектриков в емкости линии используются трансформаторное масло, дистиллированная вода и другие жидкости.

В качестве газообразного диэлектрика используется азот, углекислота, электроотрицательные газы (элегаз SF_6) или их смеси при избыточном давлении порядка 10—30 ат.

Пробивное напряжение масла в равномерном поле зависит от времени и площади электродов.

По данным [76], если $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность электрического поля, $Мв/см$; t — время, в течение которого напряжение достигает до 63% от амплитудного значения, мксек; S — площадь электродов, $см^2$, то связь между этими величинами может быть представлена в соответствии с рис. 98 в виде $E_{\text{пр}} t^{1/3} = f(S)$.

В экспериментальных данных, на основании которых построена зависимость рис. 98, наибольшая площадь электродов составляла $10^4 см^2$.

В одной из установок (Гермес II), где используется формирующая линия, питаемая от генератора импульсных напряжений, собранного по схеме Аркадьева—Маркса, на номинальное напряжение 12 Мв с общей площадью электродов $3,4 \cdot 10^6 \text{ см}^2$ были применены напряженности электрического поля, приведенные в табл. 18 [76].

При использовании в формирующих линиях в качестве диэлектрика газов под давлением допустимые рабочие напряженности зависят от состава газа, величины избыточного давления, площади электродов и времени воздействия напряжения. Обычно величины рабочих напряженностей лежат около 100 кв/см.

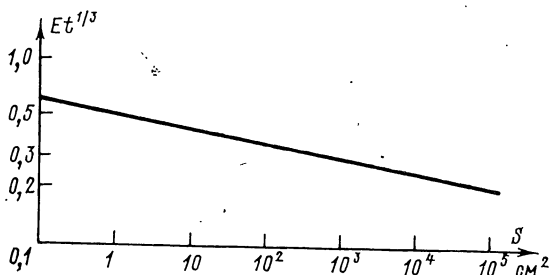


Рис. 98. Зависимость импульсной прочности трансформаторного масла от времени воздействия t и от площади электродов S

Таблица 18

Напряженности электрического поля в трансформаторном масле в формирующей линии установки Гермес II (время действия напряжения 0,53 мксек)

Цилиндр установки	Напряженность электрического поля, Мв/см	Площадь электродов, см ²	$Et^{1/3}$
Внутренний	0,21	$4,7 \cdot 10^5$	0,17
Промежуточный	0,20	$9,0 \cdot 10^5$	0,16
Наружный	0,15	$1,2 \cdot 10^6$	0,12

Примечания. 1. Внутренний электрод покрыт слоями эпоксидной краски. 2. К промежуточному цилиндру приложено максимальное напряжение — 11 Мв.

НАДЕЖНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

32. Определение допустимой рабочей напряженности, исходя из требуемой надежности конденсатора

Весьма часто импульсные конденсаторы работают в установках, где число конденсаторов достаточно большое. Это прежде всего относится к емкостным накопителям энергии, в которых количество конденсаторов может доходить до нескольких тысяч штук. В этом случае работа всей установки может быть обеспечена только при достаточно высокой надежности всех ее элементов и прежде всего конденсаторов.

Под надежностью конденсатора понимается вероятность его безотказной работы в течение гарантированного срока службы. Если для других типов конденсаторов отказы конденсаторов могут происходить как вследствие пробоя, так и вследствие недопустимых изменений других характеристик (емкости, сопротивления изоляции, $\tan \delta$), то для импульсных конденсаторов в подавляющем большинстве случаев отказ возникает вследствие пробоя конденсатора. В импульсных конденсаторах с плавкими вставками отказ возникает при уменьшении емкости выше допустимой величины (обычно более чем на 10%) вследствие отключения пробитых секций.

Для импульсных конденсаторов, работающих в режиме повторяющихся импульсов с низкой частотой повторения, гарантированный срок службы конденсатора обычно принимается 10^4 — 10^5 импульсов, что приблизительно соответствует сроку эксплуатации порядка 10 лет. Так как гарантированный срок службы определяет его нижнюю границу и, кроме того, обычно импульсные установки не всегда работают при номинальном напряжении, то реальный срок службы значительно превосходит указанную величину.

В связи с тем, что импульсные конденсаторы ра-

ботаюТ при весьма высоких напряжениях электрического поля, приближающихся к пробивным, практически невозможно гарантировать с достаточно высокой надежностью безотказную работу всей установки (или всех конденсаторов в установке) за весь срок службы. Обычно считается возможным допустить за гарантированный срок службы выход небольшого количества конденсаторов из строя, что позволяет существенно повысить допустимую рабочую напряженность, удельную энергию конденсатора и общую энергию всей импульсной установки. Доля конденсаторов, которые могут иметь срок службы менее гарантированного, или вероятность отказа одного конденсатора при принятом гарантированном сроке службы (ресурсе) Q_k обычно принимается равной 0,001—0,01, причем чем больше конденсаторов в установке, тем ниже должна быть эта величина.

Надежность одного конденсатора (вероятность безотказной работы)

$$R_k = 1 - Q_k. \quad (232)$$

При этом ожидаемое количество отказавших за гарантированный срок службы конденсаторов $N_{отк.к}$ равно произведению общего количества конденсаторов в установке N_k на вероятность отказа одного конденсатора Q_k :

$$N_{отк. к} = N_k Q_k. \quad (233)$$

Рассмотрим методику определения допустимой рабочей напряженности, при которой обеспечивается требуемая надежность конденсаторов R_k .

Если конденсатор состоит из n секций, соединенных как последовательно, так и параллельно, то пробой любой из них приводит к повышению напряжения на оставшихся последовательно соединенных секциях или группах секций, усиленному разложению пропитывающего состава вследствие плохого контакта в месте пробоя, через который протекает значительный ток в разрядном режиме, т. е. к ускоренному выходу из строя всего конденсатора. Поэтому можно считать, что пробой одной секции означает выход из строя (отказ) конденсатора.

При известной надежности конденсатора R_K требуемая надежность секции

$$R_c = 1 - Q_c = R_K^{1/n} \approx 1 - \frac{Q_c}{n}, \quad (234)$$

где

$$Q_c \approx \frac{Q_K}{n}.$$

Так, например, если при $n=100$ $Q_K=10^{-2}$, то $Q_c=10^{-4}$. Распределение сроков службы отдельных образцов изоляции (в том числе секций или конденсаторов) подчиняется распределению Вейбулла, которое в большинстве случаев достаточно хорошо может быть заменено логарифмически — нормальным законом с соответствующим средним значением (математическим ожиданием) $\lg \bar{z}$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\lg z}$.

Полученная из (234) надежность секции R_c при логарифмически нормальном распределении соответствует сроку службы z_p , причем

$$\lg z_p = \lg \bar{z} - x \sigma_{\lg z}, \quad (235)$$

где величина x находится из условия

$$R_c = F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (236)$$

Интеграл вероятностей $F(x)$ находится по таблицам [77].

Ниже приводятся некоторые характерные значения $F(x)$:

x	1,28	1,64	2,33	3,09	3,72	4,27
$F(x)$	0,90	0,95	0,99	0,999	0,9999	0,99999

Приняв в (235) z_p равным гарантированному сроку службы (например, 10^4 импульсов), можно определить соответствующий этим требованиям средний срок службы из выражения

$$\lg \bar{z} = \lg z_p + x \sigma_{\lg z}. \quad (237)$$

Затем для выбранного типа изоляции (для определенного вида диэлектрика, пропитывающей жидкости, структуры изоляции, толщины диэлектрика,

площади электродов) и для заданного режима работы по известной зависимости (59) срока службы z от рабочей напряженности E_p для найденного из (237) среднего срока службы определяется допустимая рабочая напряженность.

33. Интенсивность отказов импульсных конденсаторов

Для оценки надежности конденсаторов часто используют характеристику, называемую интенсивностью отказов λ , равную количеству отказов за единицу времени (за 1 ч) или за 1 импульс, отношению к среднему количеству образцов исправно работающих конденсаторов за данный отрезок времени, при условии, что отказавшие образцы не заменяются исправными:

$$\lambda = \frac{\Delta N}{N(t) \Delta t} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{\Delta N}{N(z) \Delta z}, \quad (238)$$

где $N(t)$ или $N(z) = \frac{N_1 + N_2}{2}$ — среднее количество образцов, исправно работающих за интервал времени Δt или при воздействии Δz импульсов; N_1 и N_2 — соответственно количество образцов, исправно работающих в начале и в конце интервала времени Δt или до и после воздействия Δz импульсов; $\Delta N = N_1 - N_2$ — количество отказов за интервал времени Δt или при воздействии Δz импульсов.

Интенсивность отказов λ в процессе эксплуатации может оставаться постоянной (экспоненциальный закон распределения) или изменяться. Для нормального или логарифмически нормального закона распределения λ растет в процессе эксплуатации. Случай $\lambda = \text{const}$ относится к периоду нормальной работы аппаратуры, состоящей из нестареющих элементов. Импульсные конденсаторы стареют в процессе работы, поэтому для них характерно возрастание величины λ в процессе эксплуатации.

Типичная зависимость λ от времени или количества импульсов приведена на рис. 99. Участок 1 от 0 до z_1 называется периодом приработки. В этом случае отказывают явно дефектные конденсаторы, случайно не выявленные контрольными испытаниями.

Участок 2 от z_1 до z_2 соответствует незначительному изменению λ в процессе эксплуатации и называется периодом нормальной работы. Участок 3 характеризуется значительным возрастанием λ и носит название периода износа, в котором работа конденсаторов перестает быть надежной.

На основании зависимости рис. 99 можно установить среднюю интенсивность отказов за период нормальной работы

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{2(N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)(z_2 - z_1)}, \quad (239)$$

где N_1 — количество конденсаторов, исправно работавших в начале этого периода (после воздействия z_1 импульсов); N_2 — количество конденсаторов, исправно работавших в конце этого периода (после воздействия z_2 импульсов).

Надежность конденсатора R_K за отрезок времени $\tau = t_2 - t_1$ или при воздействии $z = z_2 - z_1$ импульсов связана с величиной λ соотношением

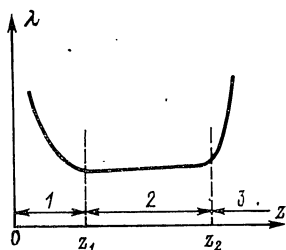


Рис. 99. Характерная зависимость интенсивности отказов импульсных конденсаторов от количества импульсов z
1 — период приработки; 2 — период нормальной работы; 3 — период износа

$$R_K = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}$$

$$\text{или } R_K = e^{-\int_{z_1}^{z_2} \lambda(z) dz} \quad (240)$$

Если принять за интервал времени $\tau = t_2 - t_1$ или при воздействии $z = z_2 - z_1$ импульсов среднее значение λ по (239), то

$$R_K = e^{-\lambda_{\text{ср}} \tau} \text{ или } R_K = e^{-\lambda_{\text{ср}} z}. \quad (241)$$

Если $\lambda_{\text{ср}} \tau \ll 1$ или $\lambda_{\text{ср}} z \ll 1$, то $R_K \approx 1 - \lambda_{\text{ср}} \tau$ или $R_K \approx 1 - \lambda_{\text{ср}} z$, и тогда

$$\lambda_{\text{ср}} \approx \frac{1 - R_K}{\tau} = \frac{Q_K}{\tau} \text{ или } \lambda_{\text{ср}} \approx \frac{1 - R_K}{z} = \frac{Q_K}{z}.$$

Так, например, при $Q_K = 10^{-2}$ и $z = 10^4$ импульсов средняя интенсивность отказов $\lambda_{\text{ср}} = 10^{-6}$ 1/имп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. М.-Л., Госэнергоиздат, 1952. 512 с. с ил.; 1959. 602 с. с ил.; Л. «Энергия», 1969. 592 с. с ил.
2. Андрианов К. А., Скипетров В. В. Синтетические жидкие диэлектрики. М., Госэнергоиздат, 1962. 196 с. с ил.
3. Liquid dielectrics. «Insulation», 9, № 6, 1963, p. 49—56.
4. Ренне В. Т. Бумажные и пленочные конденсаторы. В кн.: «Итоги науки и техники. Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели». М., изд-во АН СССР, 1964, с. 49—94 с ил.
5. Lamphier Walter C. Plastic-film capacitors. «Electronics World», 74, № 1, 1965, p. 42—44.
6. Amborski L. E. H-film — a new high temperature dielectric. — «Industr. and Eng. Chem. Prod. Res. and Developm», 2, № 3, 1963, p. 189—194.
7. Mistic G. Capacitor miniaturisation with plastic-films. — «Aero Digest», 70, № 5, 1955.
8. Ренне В. Т. Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. 202 с. с ил.; Л., «Энергия», 1971. 239 с. с ил.
9. Кучинский Г. С. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы с малыми потерями в разрядном режиме. — «Электричество», 1964, № 7, с. 39—42 с ил.
10. Зингерман А. С., Кучинский Г. С., Тиханова О. В. Пробой тонких слоев бумажно-масляной изоляции. — «Труды ЛПИ». М.-Л., Госэнергоиздат, № 12, 1954, с. 236—257 с ил.
11. Мантров М. И. Электрические разряды на поверхности диэлектриков. — «Электричество», 1940, № 9, с. 54—56 с ил.
12. Карпов Н. И., Кучинский Г. С., Тиханова О. В. Новые конструкции высоковольтных конденсаторов. — «Вестник электропромышленности», 1956, № 10, с. 19—25 с ил.
13. Багалеи Ю. В. О разрушении диэлектрика бумажно-масляных конденсаторов для импульсных схем. — «Электричество», 1955, № 3, с. 66—70 с ил.
14. Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л. Ионизационные процессы в импульсных конденсаторах с бумажно-масляной изоляцией. — «Ионизационное старение, короностойкость и методы испытания высоковольтной изоляции». ЦИНТИЭП, М., 1963, с. 69—76 с ил.
15. Nye I. R., Wilson W. R. Physical concepts of corona in capacitors. AIEE Trans, p. III, 1953, p. 781.

16. Hagenguth I. N., Liao T. W. Impulse corona-detection measurement of intensity and damage produced. AIEE Trans. v. 71, pt. III, 1952, p. 461.
17. Кучинский Г. С., Ренне В. Т., Файницкий В. М. Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов.— «Электричество», 1954, № 6, с. 70—74 с ил.
18. Кучинский Г. С. Влияние толщины диэлектрика на рабочие напряженности в конденсаторной изоляции. «Вестник электропромышленности», 1954, № 2, с. 7—11 с ил.
19. Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л. Электрические характеристики бумажно-масляной изоляции при избыточном давлении масла.— «Электричество», 1958, № 1, с. 64—67 с ил.
20. Hansson B. O. The design of power-line capacitors for series installation.— «El. Eng.», 1952, № 2, p. 112.
21. Дашук П. Н., Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л. Выбор рабочих напряженностей в импульсных конденсаторах.— «Вестник электропромышленности», 1962, № 9, с. 49—52 с ил.
22. Герцик А. К. Ионизационные характеристики бумажно-масляной конденсаторной изоляции при искаженной форме воздействующего напряжения.— «Известия НИИПТ», вып. 3, 1958, с. 62—88 с ил.
23. Кучинский Г. С. Зависимость интенсивности начальных частичных разрядов от напряжения.— «Труды ЛПИ. Электрическая изоляция», № 276, 1967, с. 91—99 с ил.
24. Переселенцев И. Ф., Проскурнин В. П. Частичные разряды в диэлектрике силовых бумажных конденсаторов.— «Силовое конденсаторостроение». Информстандартэлектро, вып. I, М., 1968, с. 52—72 с ил.
25. Held W., Kunze R. C. Glimmentladung und Lebensdauer von Starkstromkondensatoren. ETZ A82, 11, 1961.
26. Варшавский Д. С. Срок службы комбинированной конденсаторной изоляции на переменном токе. Сборник XI научно-технической конференции УКСДИ, Усть-Каменогорск, 1971.
27. High voltage low inductance energy discharges capacitors. Bulletin TSC—208, Sangamo Electric Company, Springfield, Illinois, 1962.
28. Vail G. Dielectrics for D. C. and energy storage capacitors. «Electr. Insulat. Conf. Mater. and Appl. 5-th conf.», Chicago, Ill. I, 1963.
29. Liebscher F., Held W. Kondensatoren, Dielektrikum, Bemessung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin — Heidelberg — New-York, 1968.
30. Ренне В. Т., Багaley Ю. В., Фридберг И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Киев, «Техника», 1966. 325 с. с ил.
31. Linder L., Schniedermann T. Einfluss der Eigeninduktivität von Wickelkondensatoren auf ihrem Scheinwiderstand, ETZ, № 27, 1939.
32. Кучинский Г. С., Иркаева К. М. Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями.— «Вестник электропромышленности», 1961, № 11, с. 38—41 с ил.

33. Фоменко Л. А. Индуктивность конденсаторов.— «Известия электропромышленности слабого тока», 1940, № 9, с. 47—53 с ил.
34. Патент, Франция, № 1350466, Н 01 γ
35. Гольденберг Г. М.— Бумажные силовые конденсаторы. ЦНИИПИ, М., 1965, 32 с. с. ил.
36. Патент, ФРГ, № 1133036 21д, 10₀₂ от 17.01.1963.
37. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970, 415 с. с ил.
38. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. В. С. Комелькова. М., Атомиздат, 1970, 472 с. с ил.
39. Дашук П. Н. Расчет эквивалентных параметров высоковольтных конденсаторов.— «Известия вузов. Энергетика», 1961, № 3, с. 27—34 с ил.
40. Назаров Н. И. Работа бумажно-масляных конденсаторов при несинусоидальном напряжении.— «Известия вузов. Энергетика», 1960, № 1, с. 49—53 с ил.
41. Лернер М. М. Выбор конденсаторов для электронных устройств, М., «Энергия», 1970. 152 с. с ил.
42. Гоголицын Л. З. Определение потерь в конденсаторах в импульсном режиме.— «Электричество», 1957, № 9, с. 41—45 с ил.
43. Тареев Б. М., Лернер М. М., Лернер Т. И. К расчету тепловых потерь в электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения.— «Электричество», 1970, № 5, с. 72—78 с ил.
44. Peyssou I. Condensateurs soumis a des impulsions de tension prevision du echauffement. «Ann. Radio electr.», v. 11, 1956, № 46.
45. Каден Г. Электромагнитные экраны. М.— Л., Госэнергоиздат, 1957. 327 с. с ил.
46. Конотоп В. В. Определение потерь в обкладках высоковольтных импульсных конденсаторов.— «Известия вузов. Энергетика», 1969, № 11, с. 19—22 с ил.
47. Казарновский Д. М. Потери в обкладках конденсаторов при колебательном режиме.— «Известия вузов. Энергетика», 1966, № 8, с. 28—31 с ил.
48. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. Под ред. Г. С. Кучинского. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 299 с. с ил.
49. Мантров М. И. Тепловой расчет бумаго-масляного конденсатора, собранного в металлическом баке.— «Вестник электропромышленности», 1953, № 3, с. 18—21 с ил.
50. Залесский А. М. Электрические аппараты высокого напряжения, М.—Л., Госэнергоиздат, 1957. 540 с. с ил.
51. Конторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. М., Гостехтеоретиздат, 1955. 227 с. с ил.
52. Каталог конденсаторов. Конденсаторы бумажно-масляные, применяемые в технике сильных токов, № 04.01.14—64. Конденсаторы импульсные, № 04.01.31—71; 04.01.32—71; 04.01.35—71; 04.01.36—71; 04.01.37—71. Завод «Конденсатор», Информэлектро.

53. Морозов М. М. Высоковольтные конденсаторы. ВНИИЭМ, М., 1965. 22 с.
54. Морозов М. М. Современное силовое конденсаторостроение и перспективы его развития в СССР.— «Силовое конденсаторостроение». Вып. 1. М., Информстандартэлектро, 1968, с. 3—31 с ил.
55. Гинзбург Е. Л., Рудь В. И. Новые разработки импульсных силовых конденсаторов.— «Силовое конденсаторостроение». Вып. 1. М., Информстандартэлектро, 1968, с. 127—135 с ил.
56. Гулевич А. И., Киреев А. П. Производство силовых конденсаторов. М., «Высшая школа», 1965. 356 с. с ил.
57. Кучинский Г. С. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы с малыми потерями в разрядном режиме.— «Электричество», 1964, № 7, с. 39—42 с ил.
58. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы.— «Электротехника», 1968, № 8, с. 43—45 с ил.
59. Литвинова Е. Л. Импульсные малоиндуктивные пленочные конденсаторы высокой добротности.— «Труды ЛПИ. Электрическая изоляция», 1967, № 276, с. 169—178 с ил.
60. Конотоп В. В., Линецкий В. Я., Фертик С. М. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы.— «Электротехника», 1965, № 1, с. 23—26 с ил.
61. Высоковольтные импульсные конденсаторы с бумажно-масляным диэлектриком.— «Силовое конденсаторостроение». Вып. 2. Информэлектро, 1969, с. 75—83 с ил.
62. Карабанов В. И., Иванов С. Б. Пути повышения удельных характеристик бумажных высоковольтных конденсаторов.— «Электронная техника», сер. 8, «Радиодетали», вып. 2, 1967, с. 3—10 с ил.
63. High voltage (low inductance) energy storage capacitors, Tobe Deuchmann Laboratories, Canton, Massachusetts, 1963.
64. Tuck I. L. Review of Controlled Thermonuclear Research a Los Alamos. Second united Natows International Conference of Peaceful Uses of Atomic Energy, June, 1958, USA.
65. Kolb A. C. Phys. Rev. v. 107, 1957.
66. Kemp E. L. The design of Scyllac, a 15-meter thetapinch machine, 5 Symposium on Fusion Technology, Oxford, England, 2—5 July, 1965.
67. Energy storage capacitors, British Insulated Callender's Cables Limited Capacitor devision, Helsby, Warrington, Great Britain, TDCA-1, May, 1962, Publ. N 530, July, 1967.
68. Maxwell Laboratories, High-voltage capacitors, San-Diego, California, 1967.
69. Held W., Kahl W., Pollmeier F. Energiespeicher kondensatoren. «Siemens-Z». B. 41, 1967, N 11.
70. Perigord M. Batterie de condensateurs pour decharge rapide sous une tension élevée. Франц. патент, кл. H 01 д, № 1566761, 1968.
71. Frungel F. Impulstechnik, Erzeugung und Anwendung von Kondensatorenentladungen, Akad. Verlagsgesellschaft, Greest & Portig, Leipzig, 1960.

72. *Nucleonics*, v. 17, № 12, 1959, p. 130.
73. Fitch R. A., Me Cormic N. R., IEE convention on thermonuclear processes, 29—30 April, 1959.
74. Rytman T. M., Kemp E. L. The energy storage system for a 3,5 — megajoule magnetic compression experiment, IRE Trans., Nucl. Science v. 9, 1962, 2.
75. Месяц Г. А., Насибов А. С., Кремнев В. В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. М., «Энергия», 1970. 153 с. с ил.
76. Martin T. H. Design and performance of the Sandia Laboratories Hermes II flash X-ray generator, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (V. S. Atomic energy commission), Paper B-10.
77. Гнеденко Б. В., Беяев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности М., «Наука», 1965. 524 с. с ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Характеристики основных изоляционных материалов, применяемых в импульсных конденсаторах	5
1. Особенности изоляционных материалов, применяемых в импульсных конденсаторах	—
2. Жидкие диэлектрики	6
3. Конденсаторная бумага и пленочные диэлектрики	10
Глава 2. Условия работы изоляции конденсаторов при многократных разрядах	21
4. Факторы, определяющие допустимые рабочие напряженности	—
5. Кратковременная электрическая прочность изоляции конденсаторов	—
6. Разряд по закраине	27
7. Частичные разряды в импульсных конденсаторах	30
8. Старение изоляции импульсных конденсаторов и допустимые рабочие напряженности	40
9. Сопротивление изоляции конденсатора	56
Глава 3. Расчет геометрических размеров импульсных конденсаторов	58
10. Исходные данные для расчета конденсаторов	—
11. Удельная энергия конденсатора	59
12. Выбор геометрических размеров конденсатора	60
13. Определение размеров выводов и внешней изоляции импульсных конденсаторов	62
Глава 4. Индуктивность конденсаторов	66
14. Общие положения	—
15. Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями	67
16. Индуктивность конденсаторов с пластинчатыми секциями	86

17. Оптимальные параметры конденсатора по резонансной частоте	88
Глава 5. Тепловой расчет импульсных конденсаторов	91
18. Потери энергии в импульсных конденсаторах	—
19. Определение наибольшей температуры перегрева изоляции конденсатора	108
Глава 6. Расчет плавких предохранителей. Расчет механических усилий	111
20. Расчет плавких предохранителей	—
21. Механические усилия в импульсных конденсаторах	113
Глава 7. Экспериментальное определение характеристик конденсаторов	114
22. Измерение индуктивности конденсаторов	—
23. Измерение добротности конденсаторов	115
24. Испытание конденсаторов	117
Глава 8. Типы импульсных конденсаторов и их конструкция	120
25. Отечественные типы малоиндуктивных импульсных конденсаторов	—
26. Типы малоиндуктивных импульсных конденсаторов зарубежных фирм	137
27. Типы импульсных конденсаторов, не обладающих малой индуктивностью	150
28. Импульсные конденсаторы с металлизированным диэлектриком	154
29. Конденсаторы с индивидуальными разрядниками	156
30. Импульсные конденсаторы в виде полосковых линий	159
31. Импульсные конденсаторы с жидким или газообразным диэлектриком	161
Глава 9. Надежность импульсных конденсаторов	164
32. Определение допустимой рабочей напряженности, исходя из требуемой надежности конденсатора	—
33. Интенсивность отказов импульсных конденсаторов	167
Список литературы	169